

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



PROYECTO FIN DE CARRERA

# ROBOT AUTÓNOMO COMO NODO MÓVIL DE REDES DE SENSORES

Ingeniería de Telecomunicación

Isabel Cortés de la Vega  
Junio 2011



# ROBOT AUTÓNOMO COMO NODO MÓVIL DE REDES DE SENSORES

AUTOR: Isabel Cortés de la Vega  
TUTOR: Alberto Sánchez González  
PONENTE: Dr. Javier Garrido Salas

HCTLab  
Dpto. de Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones  
Escuela Politécnica Superior  
Universidad Autónoma de Madrid  
Junio 2011



# Agradecimientos

Me gustaría agradecer a todos y cada uno de los integrantes del grupo HCTLab tanto la ayuda prestada a nivel académico como los momentos compartidos a nivel personal. Quiero dar las gracias especialmente a Ángel, por tantísimas razones que es difícil concretar alguna, a Alberto, por el trabajo codo con codo, los consejos y las risas juntos, a Guillermo, por su inestimable ayuda en temas electrónicos y mecánicos y el apoyo recibido, y a Javier, por sus recomendaciones y bromas. No me quiero olvidar de agradecer a David, con quien he compartido penas robóticas y charlas, a Víctor, por su apoyo moral y su ayuda con la parte mecánica, a Santiago, por compartir robot y puntos de vista, y a Fernando, por los ratos pasados y los consejos con la edición de la memoria.

Además, gracias a todos los amigos con quienes he compartido tantas cosas. Gracias por las risas en los buenos momentos, y el apoyo en los malos. Gracias también a los compañeros de carrera con quienes he compartido clases, horas de estudio en la biblioteca y prácticas, con ellos todo ha resultado mucho más sencillo.

Una mención de honor merecen mi madre y Jose, cuyo amor y comprensión me han acompañado en todo momento, y sin quienes no habría llegado ser quien soy. Vosotros sois la parte más importante de todo esto, y merecéis mi más inmensa gratitud.



# Resumen

## Resumen

Este proyecto trata sobre la creación de una plataforma robótica como nodo móvil autónomo con capacidad de localización en interiores. Un objetivo importante es que la plataforma sea fácilmente reproducible, para lo cual se han utilizado sólo componentes comerciales. El robot se ha diseñado con un sistema de tracción de tipo oruga para aumentar la superficie de tracción y situar el eje de giro del robot en su centro geométrico, de tal forma que el robot gire sobre sí mismo sin variar su posición. Este sistema de tracción está basado en poleas y correas de transmisión dentadas para asegurar la inexistencia de deslizamientos entre ellas. Para el movimiento del robot se emplean motores de corriente continua y encoders, lo que le permite realizar movimientos de longitud controlable con alta precisión. Dicha plataforma incluye una placa electrónica auxiliar que se encarga del acondicionamiento de las señales necesarias para su correcto funcionamiento y utiliza una placa electrónica de procesamiento basada en una FPGA y procesador embebido.

Como aplicación de demostración, con la plataforma robótica diseñada se han realizado pruebas de navegación entre distintos puntos de una habitación, utilizando un sistema de posicionamiento basado en ultrasonidos. El robot es capaz de conocer su posición y moverse a otra posición según las órdenes recibidas.

## Palabras Clave

Plataforma robótica, robot, redes de sensores inalámbricas, posicionamiento, localización en interiores, orientación, navegación, ultrasonidos, *encoders*.

## **Abstract**

This project deals with the creation of a robotic platform as an autonomous mobile node capable of indoor location. An important objective is that the platform can be easily reproducible, for which only commercial components have been used. The robot has been designed with caterpillar tracks to increase the traction surface and put the spin axis of the robot in its geometric center, so that the robot will turn around itself without changing its position. This traction system is based on toothed pulleys and belts to ensure the absence of slippage between them. For the movement of the robot DC motors and encoders are used, allowing it to make length controlled movements with high precision. This platform includes an auxiliary circuit board that handles the signal conditioning required for proper operation and uses an electronic board with FPGA based processing and an embedded processor.

As a demo application, it has been tested navigation between points in a room with the developed robotic platform, using a positioning system based on ultrasound. The robot is able to know its position and move to another position based on the received orders.

## **Key words**

Robotic platform, robot, wireless sensor network, positioning, indoors location, orientation, navigation, ultrasonics, encoders.



# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>III</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>X</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>XIV</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción a las redes de sensores inalámbricas . . . . .	1
1.2. Motivación y Objetivos . . . . .	1
1.3. Estado del Arte . . . . .	2
1.3.1. Plataformas robóticas comerciales . . . . .	2
1.3.2. Plataformas robóticas de investigación . . . . .	8
1.3.3. Conclusiones . . . . .	13
1.4. Estructura del documento . . . . .	14
<b>2. Descripción Del Robot Desarrollado</b>	<b>15</b>
2.1. Sistema de Localización por ultrasonidos . . . . .	16
2.2. Mecánica y Motores . . . . .	16
2.2.1. Mecánica y construcción de la estructura . . . . .	16
2.2.2. Motores . . . . .	17
2.3. Electrónica auxiliar . . . . .	17
2.3.1. Placa auxiliar . . . . .	17
2.4. Procesamiento . . . . .	18
2.4.1. FPGA y MicroBlaze . . . . .	18
2.4.2. Periféricos . . . . .	18
2.4.3. Software . . . . .	19
<b>3. Mecánica y Motores</b>	<b>21</b>
3.1. Estructura del Robot . . . . .	21
3.1.1. Introducción a la Estructura . . . . .	21
3.1.2. Primera estructura propuesta: TRAXSTER II de RoboticsConnection . . . . .	22

3.1.3.	Estructura definitiva . . . . .	23
3.2.	Motores . . . . .	25
3.2.1.	Motores paso a paso . . . . .	25
3.2.2.	Motores de corriente continua . . . . .	26
3.3.	Sistema de tracción de la estructura: poleas y correas . . . . .	28
3.3.1.	Poleas empleadas . . . . .	29
3.3.2.	Correas empleadas . . . . .	29
3.4.	Montaje y ajustes del sistema de tracción . . . . .	30
<b>4.</b>	<b>Electrónica</b>	<b>33</b>
4.1.	Placa inicial de pruebas, técnica <i>wrapping</i> . . . . .	33
4.1.1.	Introducción. Técnica <i>wrapping</i> . . . . .	33
4.1.2.	Características . . . . .	34
4.1.3.	Conclusiones . . . . .	36
4.2.	Placa de prueba motores, sistema de circuito impreso . . . . .	36
4.2.1.	Características . . . . .	37
4.2.2.	Pruebas realizadas . . . . .	39
4.3.	Placa definitiva, sistema de circuito impreso . . . . .	39
4.3.1.	Características . . . . .	40
4.3.2.	Explicación de funcionamiento por bloques. Esquemáticos . . . . .	41
4.3.3.	Diseño, fabricación y montaje . . . . .	51
<b>5.</b>	<b>Integración y Procesamiento</b>	<b>53</b>
5.1.	FPGA y MicroBlaze . . . . .	53
5.2.	Periféricos . . . . .	54
5.2.1.	Módulo de posicionamiento . . . . .	55
5.2.2.	Módulo de movimiento . . . . .	57
5.2.3.	Módulo de detección de obstáculos . . . . .	60
5.2.4.	Módulo de comunicación . . . . .	61
5.3.	Integración . . . . .	62
5.3.1.	Cálculo de distancias . . . . .	62
5.3.2.	Software: orientación y navegación . . . . .	64
5.3.3.	Pruebas realizadas . . . . .	65
<b>6.</b>	<b>Conclusiones y líneas futuras</b>	<b>71</b>
6.1.	Conclusiones . . . . .	71
6.2.	Líneas Futuras . . . . .	71

<b>Glosario de acrónimos</b>	<b>73</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>74</b>
<b>A. Guía de usuario</b>	<b>77</b>
A.1. Conexiones mecánicas . . . . .	77
A.2. Conexiones electrónicas . . . . .	79
<b>B. Pliego de condiciones</b>	<b>83</b>
B.1. Condiciones generales . . . . .	83
B.2. Condiciones particulares . . . . .	85
<b>C. Presupuesto</b>	<b>87</b>
<b>D. Publicación</b>	<b>89</b>



## Índice de figuras

1.1. Plataforma comercial AROBOT-P1. . . . .	3
1.2. Plataforma comercial ERA-MOBI. . . . .	4
1.3. Plataforma comercial MMP-8. . . . .	4
1.4. Plataforma comercial Wifibot. . . . .	5
1.5. Plataforma comercial RP6. . . . .	5
1.6. Plataforma comercial SUGV300. . . . .	6
1.7. Plataforma comercial TRAXSTER II. . . . .	7
1.8. Plataforma de investigación COTBOTS. . . . .	8
1.9. Plataforma de investigación ROBOMOTE. . . . .	9
1.10. Plataforma de investigación MILLIBOT. . . . .	10
1.11. Plataforma de investigación MICAbot. . . . .	11
1.12. Plataforma de investigación ZeeRO. . . . .	12
1.13. Plataforma de investigación KHEPERA. . . . .	13
2.1. Robot desarrollado. . . . .	15
2.2. Esquema de la situación de las balizas emisoras. . . . .	16
3.1. Estructura Robótica TRAXSTER II de RoboticsConnection, vistas superior e inferior. . . . .	22
3.2. Distintas configuraciones de motores en la estructura. Eje de rotación. . . . .	23
3.3. Estructura metálica diseñada. Piezas de sujeción de motores. . . . .	23
3.4. Sistema de anclaje de la estructura. Esquema los agujeros de fijación. . . . .	24
3.5. Estructura metálica diseñada. Montaje de los motores. Sistema de tracción. . . . .	24
3.6. Estructura metálica diseñada. Sistema de niveles para las placas electrónicas. . . . .	25
3.7. Motores paso a paso propuestos. De izquierda a derecha: MY4001 y los motores de la serie P542-M48. . . . .	26
3.8. Motores dc propuestos. De izquierda a derecha: GHM-04, M12V200 y EMG30. . . . .	27
3.9. Encoder E4P-100-079-DHTB de USDigital. . . . .	27
3.10. Funcionamiento encoder: explicación sentidos giro y ciclo. . . . .	27
3.11. Poleas de transmisión empleadas en la estructura. Estado original. . . . .	29
3.12. Esquema utilizado para el cálculo de la longitud de la correa. $r$ es el radio de la polea y $l$ la longitud entre ejes de la correa. . . . .	30

3.13. Correa de transmisión empleada en la estructura. Sistema de oruga. . . . .	30
3.14. Bordes sobresalientes de la polea. . . . .	31
3.15. Poleas con bordes pulidos. . . . .	31
3.16. Poleas con coronas de placa de PCB, realizadas a medida. . . . .	31
3.17. Ajustes de la estructura. Nivelación poleas. Misma distancia entre ejes. . . . .	32
3.18. Ajustes de la estructura. De izquierda a derecha: situación ideal, situación real, solución al problema. . . . .	32
4.1. Herramientas utilizadas para crear un prototipo de placa con la técnica <i>wrapping</i> . .	34
4.2. Resultado de aplicar la técnica <i>wrapping</i> en un pin. . . . .	34
4.3. Placa auxiliar inicial, sistema de <i>wrapping</i> . Vistas delantera y trasera. . . . .	36
4.4. Equipo utilizado en la fabricación de placas de circuito impreso. . . . .	37
4.5. Placa auxiliar de motores. Vistas frontal y trasera. . . . .	38
4.6. Esquemático de la placa auxiliar de motores. . . . .	38
4.7. Vistas frontal y trasera de la placa auxiliar. . . . .	39
4.8. Esquemático completo de la placa auxiliar. . . . .	42
4.9. Esquemático del bloque de alimentación de la placa auxiliar. . . . .	43
4.10. Esquemático del bloque de ultrasonidos de la placa auxiliar. . . . .	44
4.11. Esquemático del bloque de radio de la placa auxiliar. . . . .	45
4.12. Esquemático del bloque de motores de la placa auxiliar. . . . .	46
4.13. Esquemático del bloque de Zigbee de la placa auxiliar. . . . .	47
4.14. Esquemático del bloque de detección de obstáculos de la placa auxiliar. . . . .	48
4.15. Esquemático del bloque de conexión y acondicionamiento de la placa auxiliar. . . .	49
4.16. Esquemático del bloque de pines de propósito general de la placa auxiliar. . . . .	49
4.17. Esquemático del bloque de conversión analógico/digital de la placa auxiliar. . . . .	50
5.1. Placa comercial Avnet Spartan 3A Evaluation kit. Vistas frontal y trasera. . . . .	54
5.2. Diagrama de los periféricos implementados. . . . .	55
5.3. Estimación del tiempo de vuelo de la señal de ultrasonidos. . . . .	55
5.4. Trama de localización. . . . .	56
5.5. Triangulación. Esferas de posición del nodo móvil. . . . .	56
5.6. Registros utilizados en el periférico de motor y <i>encoders</i> . . . . .	58
5.7. Diagrama de estados para la interpretación de los <i>encoders</i> . . . . .	60
5.8. Sensor detector de infrarrojos digital SHARP GP2D150A. . . . .	61
5.9. Módulo Zigbee empleado: Xbee PRO series 2, de Digi International. . . . .	61
5.10. Fórmula empírica de conversión de distancia en pulsos. . . . .	63
5.11. Fórmula empírica de conversión de ángulos en pulsos. . . . .	64

5.12. Diagrama de cálculo de la orientación del nodo. . . . .	64
5.13. Error en la orientación debido al posicionamiento. . . . .	65
5.14. Algoritmo iterativo de navegación. . . . .	66
5.15. Esquema de medición de errores. Caminos ideal y real. . . . .	67
5.16. Prueba 1. Ruta realizada por el robot. Puntos de medida de posición. . . . .	68
5.17. Puntos alcanzados por el robot durante la prueba 1. . . . .	68
5.18. Prueba 2. Ruta realizada por el robot. Puntos de medida de posición. . . . .	69
5.19. Puntos alcanzados por el robot durante la prueba 2. . . . .	70
A.1. Esquema de conexiones con la placa auxiliar desarrollada. . . . .	77
A.2. Diagrama de montaje de la estructura robótica. . . . .	78
A.3. Diagrama de montaje de las placas electrónicas. . . . .	78
A.4. Aspecto final del montaje del robot. . . . .	79
A.5. Esquema de conexiones con la placa auxiliar desarrollada. . . . .	79
A.6. Esquema de numeración del conector de 40 pines. . . . .	82





## Índice de tablas

1.1. Características de las plataformas comerciales . . . . .	8
1.2. Características de las plataformas de investigación . . . . .	13
3.1. Comparativa de los motores paso a paso estudiados. . . . .	26
3.2. Comparativa de los motores de estudiados. . . . .	28
3.3. Comparativa de las poleas Synchroflex estudiadas. . . . .	29
3.4. Comparativa de las correas Synchroflex estudiadas. . . . .	30
5.1. Prueba 1 del sistema desarrollado. Error en distancia y ángulo. Número de iteraciones necesarias. . . . .	68
5.2. Prueba 2 del sistema desarrollado. Error en distancia y ángulo. Número de iteraciones necesarias. . . . .	69
5.3. Ángulos de giro con baterías a plena y media carga. Ángulo ordenado 90 grados. .	70
A.1. Descripción de los pines de la placa auxiliar desarrollada. . . . .	80
A.2. Descripción del conector de 40 pines de la placa auxiliar desarrollada. . . . .	81



# 1

## Introducción

### 1.1. Introducción a las redes de sensores inalámbricas

---

Una red de sensores inalámbrica (en inglés: Wireless Sensor Network o WSN) está formada por nodos equipados con sensores, que colaboran juntos para llevar a cabo una tarea común. Los nodos se comunican entre ellos o con un ordenador de manera inalámbrica, transmitiendo periódicamente los datos recogidos. Aunque originalmente las redes de sensores inalámbricas se pensaron para nodos fijos, en la actualidad se han desarrollado sistemas con nodos móviles.

Las redes de sensores inalámbricas han ido adquiriendo importancia a lo largo de los últimos años debido a sus numerosas áreas de aplicación [1–3]. Actualmente son un tema activo de investigación en universidades aunque podemos encontrar algunas aplicaciones comerciales basadas en WSN.

Dentro de las redes de sensores inalámbricas es importante destacar el papel de los nodos móviles, que aportan beneficios como reparar la red en caso de que se pierda un nodo fijo, un menor consumo y mayor facilidad para recargar la batería debido a su capacidad de desplazamiento. En este tipo de redes, tareas como la planificación de movimientos del nodo móvil o el diseño del sistema localización suponen un gran reto.

Este proyecto se centra en el diseño y construcción de una plataforma robótica para ser integrada como nodo en una red de sensores inalámbrica con nodos móviles.

### 1.2. Motivación y Objetivos

---

La localización es imprescindible para un nodo móvil. Existen diferentes métodos de localización tanto para interiores [4, 5] como para exteriores. Nuestro objetivo es la creación de un robot que pueda integrarse en una red de sensores inalámbrica interior como nodo móvil, siendo capaz de utilizar un sistema basado en ultrasonidos para orientarse. Las funciones del robot se basan en su capacidad de movimiento, de localización, y detección de obstáculos.

Para la localización existen diversos métodos como el uso de cámaras o GPS, pero son métodos a descartar ya que las cámaras requieren una alta capacidad de procesamiento e implican un alto consumo energético y coste, y el uso de GPS no es aplicable en entornos cerrados, por la ausencia

de cobertura en interiores, ni es capaz de lograr la suficiente precisión para el tamaño del robot. También se puede utilizar la detección de obstáculos como elemento localizador, pero éste método sólo resulta útil si el robot se encuentra cerca de alguna pared u obstáculo, causando problemas en regiones libres de los mismos.

Un método alternativo es el uso de sensores de ultrasonidos por su bajo coste y su adecuada precisión. Mediante este tipo de sensores se puede obtener la posición del robot calculando el tiempo de vuelo de la señal de ultrasonidos, que es el tiempo transcurrido desde que el emisor transmite la señal hasta que el receptor la recibe. Una vez calculado este tiempo, y conociendo la velocidad de propagación de la señal (velocidad del sonido), se puede calcular la distancia entre el emisor y el receptor. El cálculo del tiempo de vuelo requiere que el receptor conozca el instante de emisión, lo que se puede solucionar mediante la emisión de una señal por radiofrecuencia de forma simultánea. Esto es posible ya que la señal de radiofrecuencia se transmite a la velocidad de la luz y llega en un tiempo despreciable al receptor ( $10^6$  veces aproximadamente más rápido que los ultrasonidos).

Los problemas inherentes a este tipo de sistemas son las sombras acústicas que surgen por objetos cercanos que se interponen en el camino entre emisor y receptor, y los problemas relacionados con el rebote de la señal de información en dichos objetos o las paredes. Estos problemas provocan que se obtengan datos erróneos de la posición del robot-móvil.

Otro método alternativo es el uso de *encoders* en los motores que permitan determinar la distancia recorrida por el robot cuando éste se desplaza. Mediante este sistema, el robot podrá conocer dónde está respecto al punto de partida. Sin embargo, los *encoders* conllevan problemas de acumulación de errores, ya que se trata de un sistema inercial en el que conociendo la posición inicial se obtiene la final, a través de la suma de todos los movimientos intermedios realizados. Como cada movimiento intermedio puede conllevar un pequeño error, el error de posicionamiento es acumulativo.

Vistos los problemas que conllevan todas estas soluciones y que ninguna es por sí sola una buena alternativa para ocuparse de la localización, se apuesta por el concepto de *Sensor-Fusion*, que consiste en combinar varios métodos para aumentar la precisión global. Este método logra unas mayores ventajas a costa de obtener información redundante, con lo que se obliga a la toma de decisiones cuando distintos métodos arrojan resultados diferentes, teniendo que elegir entre unos y otros con unas reglas predefinidas. Para este proyecto utilizaremos sensores de ultrasonidos y *encoders*.

El objetivo fundamental de este proyecto es la construcción de un nodo móvil autónomo capaz de localizarse en una red de balizas de ultrasonidos. La localización se realizará mediante los datos proporcionados tanto por la red de emisores de ultrasonidos como por los *encoders*.

---

### **1.3. Estado del Arte**

---

En este apartado se trata de resumir el estado actual de desarrollo de las plataformas robóticas móviles, e intenta restringir el campo de análisis en el subconjunto de unidades de reducido tamaño y bajo coste. Se analizan tanto plataformas robóticas comerciales como de investigación.

#### **1.3.1. Plataformas robóticas comerciales**

La ventaja fundamental de las plataformas comerciales es la garantía de un correcto funcionamiento, su disponibilidad y repetitividad.

A continuación se ofrecen siete plataformas seleccionadas con sus características más relevantes. Todas tienen en común su tamaño reducido y un coste relativamente bajo.

### AROBOT-P1[6] (Arrick Robotics)

La plataforma comercial AROBOT-P1 mide 25,4 x 25,4 cm y tiene una altura de 12,7 cm, su peso es de 0,9 kg. Es de fácil montaje y programación. Tiene un precio aproximado de unos 228 €. Se incluye una fotografía de esta plataforma en la figura 1.1. Consta de:



Figura 1.1: Plataforma comercial AROBOT-P1.

- Estructura de aluminio.
- Sensores frontales de detección de obstáculos.
- Motor de giro para las ruedas traseras
- Motor de 12 V de corriente continua encargado de la tracción delantera. La velocidad del mismo se controla mediante modulación por ancho de pulsos o PWM.
- *Encoder* óptico conectado al motor con 20 pulsos por vuelta.
- LEDs con control directo por parte del usuario en rojo y verde.
- Transductor de sonidos.
- Dos botones de uso configurable.
- Tres puertos para conexión de servos, con posibilidad de añadir al robot dos brazos y una cabeza.
- Puerto de comunicaciones serie.
- Conector para expansión.
- Fuente de alimentación constituida por ocho baterías de tamaño AA, con una autonomía aproximada de cinco horas, debido a un consumo de 50 mA en reposo y 200 mA con los motores funcionando.

### ERA-MOBI[7] (Videre Design)

ERA-MOBI tiene un tamaño de 40 x 37 cm y una altura de 18 cm, pesa 4,5 kg. Incluye motores de gran potencia. Esta plataforma se puede observar en la figura 1.2. Consta de:

- Estructura plana de aluminio que permite el montaje de un PC a bordo para programar el robot.
- Motores industriales de corriente continua con reductora y 72 W de potencia conectados a las ruedas delanteras.



Figura 1.2: Plataforma comercial ERA-MOBI.

- Rueda trasera direccional.
- *Encoder* óptico de precisión que entrega 500 pulsos por vuelta.
- Microcontrolador integrado de 16 bits.
- Comunicación inalámbrica.
- Batería de fosfato de hierro de 12,8 V y 20 Ah. Autonomía de 20 horas parado y 8 en movimiento.

### **MMP-8[8] (The Machine Lab)**

Mide 38,73 x 31,75 cm y 10,8 cm de alto, con un peso de 3,4 kg. Tiene un sistema de tracción de seis ruedas que le otorgan un aspecto de tanque militar, y una suspensión central que permite una rotación independiente del chasis en terrenos desnivelados. Su precio es de 550 €. Esta plataforma se puede observar en la figura 1.3. Consta de:



Figura 1.3: Plataforma comercial MMP-8.

- Chasis de aluminio.
- Tubo pasivo como conector de las dos piezas que forman la suspensión central.
- Seis motores de corriente continua con reductora, controlados por modulación por ancho de pulso o PWM.
- Controlador de motores de doble canal manejable por radio o por puerto serie.
- Batería recargable de Níquel-Cadmio de 12 V y 1400 mAh. Autonomía de 45 minutos en movimiento. Posibilidad de recargar las baterías en movimientos que no requieran esfuerzo para los motores, como el avance del robot cuesta abajo.

### **Wifibot[9] (RoboteQ)**

Mide 58 x 38 cm con 13 cm de altura. Su precio aproximado es de unos 510 €. Su aspecto es de base para automóvil. Requiere conocimientos de mecánica y electrónica para su montaje. Esta plataforma se puede observar en la figura 1.4. Consta de:

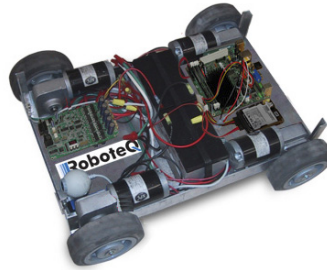


Figura 1.4: Plataforma comercial Wifibot.

- Estructura de aluminio.
- Cuatro motores de 12 V de corriente continua con reductora.
- Controlador de motores de doble canal con puerto serie para la conexión con un ordenador.
- Placa base con procesador de 600 MHz embebido. Interfaces de diferente tipo disponibles. Software propio de configuración.
- Disco duro.
- Conexión inalámbrica.
- LEDs de control.
- Alimentación de dos baterías de 12 V.

### **RP6[10] (The Robot Shop)**

Sus medidas estimadas son de 18 cm x 13,5 cm x 5,8 cm de alto. Cuenta con un sistema de tracción de tipo oruga. Tiene un precio aproximado es de unos 170 €. Esta plataforma se puede observar en la figura 1.5. Consta de:

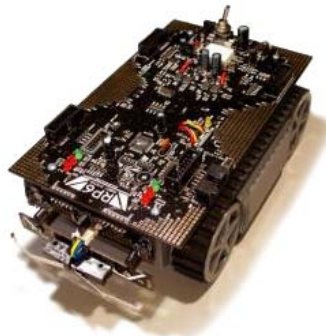


Figura 1.5: Plataforma comercial RP6.

- Chásis de plástico.
- Dos correas motrices.
- Dos motores dc a 7,2 V.
- Placa base con microcontrolador de 8 bits a 16 MHz, incorporado.
- Memoria con interfaz serie/paralelo EEPROM.
- Disco duro.
- Conversor analógico/digital integrado.
- *Encoder* de alta resolución, con 625 pulsos por rotación.
- Sensor de audio.
- Puerto disponible para conectar una pantalla de cristal líquido (LCD).
- LEDs indicadores de estado.
- Botones de control.

### **SUGV 300[11] (iRobot y Boeing)**

Su nombre son las siglas de Small Unmanned Ground Vehicle, o pequeño vehículo autónomo terrestre. Sus aplicaciones son fundamentalmente militares. Tiene unas medidas de 70 x 35 cm y 23 cm de alto, pesa 13,15 kg. Cuenta con un sistema de tracción de tipo oruga, e incluye dos correas auxiliares con suspensión rotatoria que le permiten superar obstáculos e incluso subir escaleras. Esta plataforma se puede observar en la figura 1.6.



Figura 1.6: Plataforma comercial SUGV300.

Consta de:

- Chásis de aluminio.
- Dos correas motrices y dos auxiliares.
- Módulo transceptor de radio.
- Cámara frontal.
- Mando de control remoto.
- Comunicación inalámbrica de hasta 1 km de cobertura en muy altas frecuencias.



- Ranuras para componentes adicionales.
- Alimentación por baterías de litio recargables de 28,8 V con autonomía de 6 horas.
- Cámara frontal gran angular de  $107^\circ$ , con resolución de 640 x 480 píxeles.

### TRAXSTER II[12] (RoboticsConnection)

Se trata de una estructura robótica disponible en kit para ser montada por el usuario. Sus aplicaciones son educativas y está pensado para su uso en interiores. La estructura tiene unas dimensiones de 229 mm x 203 mm de ancho y 76 mm de largo, y pesa 0,9 kg sin baterías. Cuenta con un sistema de tracción de tipo oruga, y tiene varios módulos adicionales disponibles. La plataforma se puede observar en la figura 1.7. Tiene un precio aproximado de 140 €. Consta de:



Figura 1.7: Plataforma comercial TRAXSTER II.

- Chasis de aluminio.
- Dos correas.
- Motores 7.2V dc con reductora 1:52, 160 rpm sin carga.
- *Encoders* en cuadratura.
- 6 baterías AA.

Módulos opcionales:

- Cámara CMUcam2/2+.
- Sensores infrarrojos.
- Botones de entrada y salida.
- LEDs.
- Bluetooth, antena XBEE.

### Resumen de las plataformas comerciales presentadas

En la tabla 1.1 se presentan las características más relevantes de las plataformas comerciales presentadas.

Plataforma	Medidas (cm)	Peso (kg)	Tracción	Alimentación	Auto-nomía (h)	Características	Precio (€)
Arobot	25,4 x 25,4 x 12,7	0,9	2 ruedas	8 baterías AA	5	conexión servos, <i>encoder</i>	228
Era-Mobi	40 x 37 x 18	4,5	2 ruedas	baterías 12,8 V	8	<i>encoder</i> , inalámbrico	-
MMP-8	38,73 x 31,75 x 10,8	3,4	6 ruedas	batería Ni-Cd 12 V	0.75	PWM, rotación chasis independiente	550
Wifibot	58 x 38 x 13	-	4 ruedas	2 baterías 12 V	-	inalámbrico	510
RP6	18 x 13,5 x 5,8	-	2 correas	-	-	<i>encoder</i> , sensor audio	170
SUGV300	70 x 35 x 23	13,1	2 correas	baterías Li 28,8 V	6	inalámbrico, cámara, correas auxiliares	-
Traxster II	22,9 x 20,3 x 7,6	0.9	2 correas	6 baterías AA	-	<i>encoders</i>	140

Tabla 1.1: Características de las plataformas comerciales

### 1.3.2. Plataformas robóticas de investigación

Las plataformas robóticas de investigación tienen como principal ventaja frente a las comerciales la mayor flexibilidad en la elección de sus componentes. Además se cuenta con la posibilidad de compartir información y progresos con la comunidad científica, lo que enriquece la capacidad de mejora de las mismas.

Nuevamente, en este subapartado, se han seleccionado plataformas de tamaño reducido y bajo coste.

#### COTBOTS[13] (Universidad de Berkeley)

Su objetivo principal es utilizar componentes comerciales para construir plataformas modulares de bajo coste. Con dichas plataformas, se quiere investigar algoritmos distribuidos de larga escala, como los utilizados en las redes de sensores inalámbricas.

La plataforma desarrollada por la Universidad de Berkeley mide 12.7 x 6.53 cm con una altura de 7.62 cm. Se ha desarrollado a partir de un coche de juguete que puede alcanzar los 20 km/h. La plataforma se puede observar en la figura 1.8.



Figura 1.8: Plataforma de investigación COTBOTS.

Consta de:

- Chasis de plástico.
- Cuatro ruedas motrices.
- Placa MotorBoard encargada del control de motores, con controladores de motor de doble canal.

- Placa MICA Mote, con un microprocesador de 8 bits de bajo consumo, con memoria flash, EEPROM y SRAM interna.
- Conexión inalámbrica por radio.
- Comunicación serie, con dos UARTs programables y una interfaz serie/paralelo.
- Conversor analógico/digital de 10 bits y 8 canales.
- Radio FM.
- LEDs configurables.
- Puerto JTAG.
- Conector de 51 pines para el intercambio de señales.
- Baterías con regulador de tensión a 3,3 V, para la alimentación de las placas MotorBoard y MICA Mote.
- Sistema operativo de código libre, TinyOS.

Expansiones disponibles:

- Sensores de luz y temperatura.
- Micrófono.
- Acelerómetro.
- Magnetómetro.

### **ROBOMOTE[14, 15] (Universidad de Southern California)**

Esta plataforma se construye con el objetivo de cumplir los parámetros propios de las redes ad-hoc y las redes de sensores inalámbricas: bajo consumo, facilidad de construcción, e inclusión de sensores y actuadores necesarios para cumplir los objetivos de movilidad, comunicación y localización de cada unidad.

Tiene un tamaño muy reducido, con medidas de 7 x 4,5 cm y 3,5 cm de alto. Se incluye una fotografía de esta plataforma en la figura 1.9.



Figura 1.9: Plataforma de investigación ROBOMOTE.

Consta de:

- Estructura en miniatura.

- Dos ruedas motrices diferenciales.
- Dos micro servos independientes para tracción. Control por modulación por ancho de pulsos o PWM.
- Interfaz inalámbrica por radio de hasta 55 m de alcance. Comunicación por protocolo serie.
- Odometría.
- Brújula electrónica como sistema de orientación y precisión de  $6^\circ$ .
- Transmisores y receptores de infrarrojos, alojados en la parte frontal y trasera para favorecer el desarrollo de comportamientos de seguimiento.
- Alimentación principal proporcionada por tres baterías de 1,5 V.
- Celda solar para la recarga de dichas baterías.
- Microcontrolador Atmel de 8 bits.
- Sistema operativo de código libre, TinyOS.

### **MILLIBOT[16] (Instituto Carnegie Mellon)**

Los principios fundamentales para la construcción de esta estructura han sido la especialización de las funcionalidades de cada miembro del equipo y la colaboración entre los mismos.

Esta estructura mide 5,3 x 6,2 cm y 6,3 cm de altura. Se puede observar la estructura en la figura 1.10.

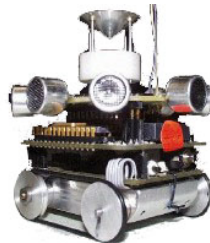


Figura 1.10: Plataforma de investigación MILLIBOT.

Consta de:

- Estructura modular en miniatura. Existen distintos módulos disponibles según sea la tarea a realizar por cada estructura concreta. Por ejemplo, algunas plataformas se configurarán para exploración del entorno, y otras para análisis sensorial. La modularidad se logra a través del montaje de subsistemas autónomos, dotados de procesador y circuito de interfaz.
- Dos correas motrices diferenciales, con sistema de oruga.
- Interfaz inalámbrica.
- Sónar de corto/largo alcance para detección de obstáculos, utilizado en el módulo sensorial. Ocho transductores piezoeléctricos montados en anillo alrededor de la estructura captan los pulsos reflejados en presencia de obstáculos.
- Sensores de infrarrojos para detección de obstáculos de corto alcance. En el módulo sensorial, éstos sensores introducen información adicional de obstáculos en caso de fallo del sónar.

- Sensores de infrarrojos para detección de fuentes de calor como personas o llamas. En el módulo de detección direccional de infrarrojos se utiliza un sensor de infrarrojos piroeléctrico montado sobre una plataforma rotatoria que escanea un rango de  $170^\circ$  en 5 segundos.
- Cámara digital para identificación de obstáculos detectados. Las muestras de vídeo son transmitidas a través de un canal de radio frecuencia compartido por todos los robots.
- Transceptor ultrasónico. Utilizado para determinar las distancias existentes entre unas plataformas y otras. Calcula la posición relativa de cada robot en su entorno de trabajo.
- Funciona mediante 2 baterías Ni-MH de 3,2 V.

### **MICAbot[17] (Universidad de Notre Dame)**

Se trata de una plataforma en miniatura. Tiene diferentes módulos disponibles, según la aplicación que se le quiera dar a cada plataforma, con una amplia gama de sensores modulares.

Tiene un tamaño muy reducido, con medidas de 8,6 x 6,1 cm y una altura de 2,1 cm. Se incluye una fotografía de esta plataforma en la figura 1.11.



Figura 1.11: Plataforma de investigación MICAbot.

Consta de:

- Estructura en miniatura.
- Dos ruedas motrices diferenciales de 3,3 cm de diámetro.
- Dos motores independientes de corriente continua controlados por modulación por ancho de pulsos o PWM.
- Rueda trasera esférica omnidireccional.
- Placa MICA Mote, con microprocesador Atmel de 8 bits.
- Interfaz inalámbrica por radio.
- Sensores de efecto Hall, que combinados con los doce imanes montados en círculo en la cara interna de cada rueda, sirven para medir la posición relativa del robot y la velocidad de avance.
- Alimentación diferenciada con batería recargable de Ni-MH y 4,5 V para los motores y dos baterías AA de 1,2 V para la parte electrónica.
- UART externa y puerto SPI disponibles.
- Sistema operativo de código libre, TinyOS.

### **ZeeRO[18] (Universidad técnica de Cluj-Napoca)**

Es una plataforma robótica abierta, de la que se discuten las fases de desarrollo. En esta plataforma se ha intentado lograr una mayor flexibilidad utilizando la tecnología Bluetooth para los enlaces inalámbricos de comunicación.

La fotografía de esta plataforma se encuentra en la figura 1.12.

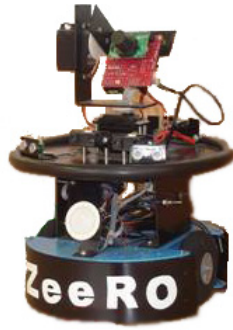


Figura 1.12: Plataforma de investigación ZeeRO.

Consta de:

- Estructura de aluminio.
- Dos ruedas motrices diferenciales.
- Placa Brainstem Moto, encargada de controlar la velocidad de los servos con modulación por ancho de pulso o PWM. Además añade al sistema interfaces como un canal analógico/digital de 10 bits o un bus I2C.
- Unidad de procesamiento constituida por una placa *Waysmall Gumstix*, en la que se encuentra integrado un microprocesador RISC de 32 bits. Esta placa tiene soporte para el sistema operativo Linux, de acuerdo con el propósito de mantener el desarrollo de la arquitectura abierto.
- Interfaz radio Bluetooth.
- Sensores infrarrojos.
- Sensores ultrasónicos.
- Cámara de vídeo con brazo móvil.
- Sensor piroeléctrico.

### **KHEPERA[19] (Escuela Politécnica Federal de Lausanne)**

Esta plataforma ha sido comercializada por la *K-Team Mobile Robot*. En la Universidad de Paderborn, se ha desarrollado una torre de extensión, basada en una FPGA y un microcontrolador (modulo FPGA $\mu$ C), para mejorar los recursos de cálculo del sistema, adaptar la plataforma a las tareas de tiempo real y explotar las propiedades de reconfiguración que ofrece la placa.

Kephera, mide 5,5 x 5,5 cm y tiene una altura de 3 cm. La fotografía de esta plataforma se encuentra en la figura 1.13.

Consta de:



Figura 1.13: Plataforma de investigación KHEPERA.

- Estructura protectora envolvente.
- Dos ruedas motrices diferenciales.
- Dos servo motores.
- *Encoders* para monitorización de la rotación angular de las ruedas, con precisión de 12 pulsos por milímetro.
- Ocho sensores infrarrojos de luz y proximidad.
- Bluetooth.
- Cámara de vídeo.
- Alimentación proporcionada por baterías recargables de Ni-Cd con autonomía de 30 minutos.
- Módulo de cálculo equipado con procesador de 32 bits de Motorola.
- Módulo opcional de extensión FPGA $\mu$ C para poder procesar datos de un mayor número de sensores. Para ello se incluye un microcontrolador Cypress de 8 bits, una FPGA VirtexE de Xilinx, memoria flash y SDRAM, módulo Bluetooth, y transceptor de infrarrojos.

### Resumen de las plataformas de investigación presentadas

En la tabla 1.2 se presentan las características más relevantes de las plataformas de investigación presentadas.

Plataforma	Medidas (cm)	Tracción	Alimentación	Características
CotBots	12,7 x 6,5 x 7,6	4 ruedas	baterías 3,3 V	comunicación serie
Robomote	7 x 4,5 x 3,5	2 correas	3 baterías 1,5 V	carga solar, odometría, brújula
Millibot	5,3 x 6,2 x 6,3	2 correas	2 baterías Ni-MH 3.2V	sensores: ultrasonidos, infrarrojos, sónar
MICAbot	8,6 x 6,1 x 2,1	2 ruedas	baterías: 4,5 V Ni-MH y 2 AA 1,2 V	sensores Hall
Zeero	-	2 ruedas	-	sensores: infrarrojos piroeléctrico y de ultrasonidos, cámara
Kephera	5,5 x 5,5 x 3	2 ruedas	baterías Ni-Cd	<i>encoders</i> , cámara

Tabla 1.2: Características de las plataformas de investigación

### 1.3.3. Conclusiones

Nuestros requisitos para la plataforma robótica son tamaño reducido, *encoders* de alta precisión y una plataforma tal que pueda mantener su eje de rotación en el centro de la misma, todo ello a bajo coste.

La restricción de presentar el eje de rotación en el centro de la estructura se cumple fácilmente con un sistema de tracción de tipo oruga, lo que reduce la selección a las plataformas comerciales RP6, SUGV300, TRAXSTERII. De éstas, se descarta la plataforma SUGV300 por estar diseñada para otro tipo de aplicaciones distintas a las que se van a utilizar en el proyecto, ya que éstas son fundamentalmente militares. También se descarta la plataforma RP6, ya que resulta poco robusta, al estar fabricada con piezas de plástico.

De todas las plataformas presentadas, la que más se adapta a nuestros requerimientos es la estructura TRAXSTERII, de RoboticsConnection, ya que cuenta con sistema de tracción de tipo oruga, es robusta, cuenta con dos *encoders* y tiene un precio asequible. Por este motivo, se procede a su compra.

Sin embargo, y como se verá en capítulos posteriores, la plataforma TRAXSTERII no fue capaz de satisfacer las necesidades del proyecto, lo que llevó al diseño y construcción de una plataforma robótica a medida.

## 1.4. Estructura del documento

---

En este capítulo se ha explicado la motivación y objetivos de este proyecto y se ha analizado el estado del arte. En los siguientes capítulos se procede a explicar en detalle la ejecución del proyecto de la siguiente manera:

- En el segundo capítulo se introduce el sistema desarrollado, comentando de manera general las distintas partes de este proyecto, para obtener una visión de conjunto.
- En el tercer capítulo se trata de manera específica la parte mecánica y de tracción del robot implementado.
- En el cuarto capítulo se comentan todos los aspectos referentes a la electrónica auxiliar, que se encarga de la recepción y acondicionamiento de señales, y se utiliza como paso intermedio para conectar los dispositivos finales a la unidad de procesamiento de datos.
- En el quinto capítulo se explica la parte de lógica y control del nodo móvil, dividiéndose en una parte hardware que se encarga de realizar los cálculos de posición y distancia, y una software que se encarga de la comunicación con el nodo y el sistema de navegación del mismo.
- Por último, en el sexto capítulo, se mencionan las conclusiones del proyecto y las líneas futuras a seguir.

Además de los capítulos mencionados se incluyen como apéndices la guía de usuario del robot desarrollado, el pliego de condiciones, el presupuesto, y una publicación derivada de este proyecto.



# 2

## Descripción Del Robot Desarrollado

Este capítulo resume las características fundamentales del robot desarrollado, figura 2.1. En él se abordan temas como la localización, la mecánica de la estructura, los motores empleados y la electrónica auxiliar. Además se trata la parte de procesamiento del robot, tanto hardware como software. Todos estos puntos se explican de una manera más extensa en los capítulos posteriores, como se indica dentro de cada apartado.

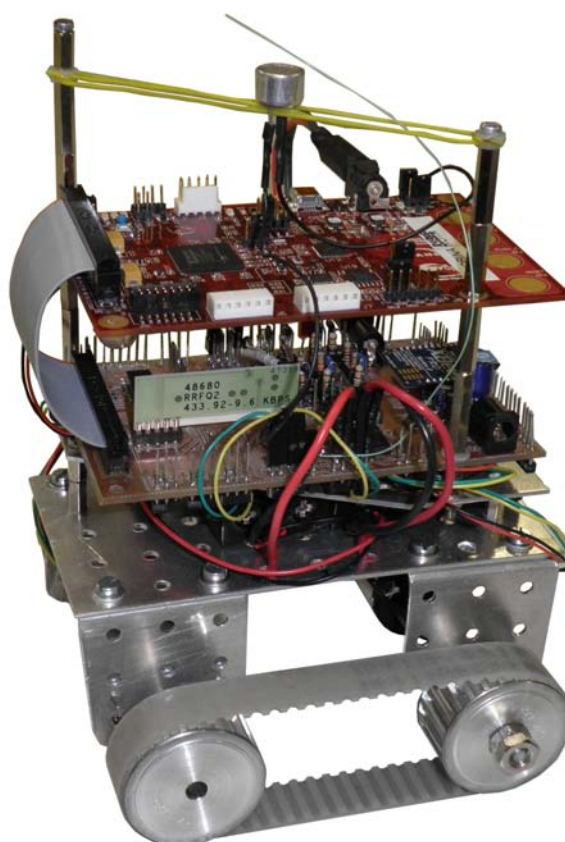


Figura 2.1: Robot desarrollado.

## 2.1. Sistema de Localización por ultrasonidos

---

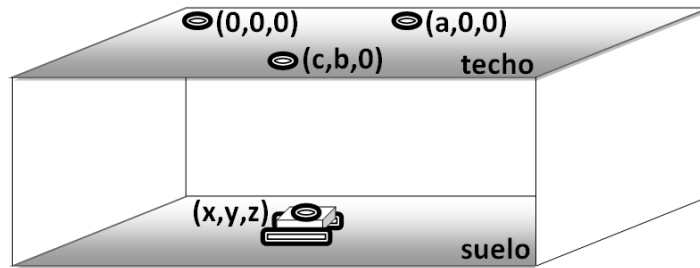


Figura 2.2: Esquema de la situación de las balizas emisoras.

El robot desarrollado incorpora un sistema de localización de precisión para interiores. Para ello, se dispone de una serie de balizas emisoras de ultrasonidos colocadas en el techo, tal y como puede apreciarse en la figura 2.2. Dichas balizas emiten señales de ultrasonidos de manera continua junto con una señal de radio que lleva codificado el número de baliza emisora. La señal de radio se transmite en un tiempo despreciable frente a la señal de ultrasonidos, debido a la diferencia entre la velocidad de la luz y la del sonido. Por ello, la señal de radio se utiliza como tiempo inicio para poder contabilizar el tiempo de vuelo de la señal de ultrasonidos, o el tiempo que tarda la señal en viajar desde la baliza emisora hasta el receptor del robot.

Sabiendo el tiempo de vuelo de cada señal emitida por las diferentes balizas, y la velocidad del sonido, se pueden calcular las distancias del robot a cada una de las balizas del techo. Aplicando el método de trilateración se calcula la posición exacta del robot. El sistema de cálculo de distancias por ultrasonidos se explica con mayor profundidad en el apartado 5.2.1.

## 2.2. Mecánica y Motores

---

Para construir un robot, es fundamental la estructura sobre la que se colocan todos los componentes necesarios. Dicha estructura debe servir para alojar los motores que la dotarán de movimiento, la alimentación de los motores y la parte electrónica, y las placas que se encargan del funcionamiento del robot.

### 2.2.1. Mecánica y construcción de la estructura

La plataforma robótica es la base sobre la que se construye el robot. Por ello es importante que cumpla una serie de requisitos, tales como un tamaño adecuado para nuestro sistema de localización, del orden de decenas de centímetros, o un sistema de tracción con suficiente adherencia con el suelo.

Para este proyecto se ha construido una plataforma robótica a medida, con planchas de aluminio preperforadas y un sistema de tracción de tipo oruga. La elección de este sistema de tracción se debe a que se desea mantener el centro de giro de la estructura en el centro físico de la misma. De esta manera, se puede colocar un sensor receptor de ultrasonidos en dicho centro, de forma que en los giros, para el sistema de posicionamiento por ultrasonidos, la estructura se mantenga en la misma posición. El receptor de ultrasonidos recoge las señales emitidas por las balizas del techo. Con estos datos se pueden calcular las distancias a las balizas y por tanto, la posición del robot.

En la estructura fabricada, se colocan dos motores que se encargan del movimiento del robot. El sistema de tracción es de tipo oruga, por lo que para cada lado de la estructura se necesita un motor y un eje fijo. A cada eje, tanto el del motor como el fijo se conectan dos poleas de transmisión dentadas que harán de las ruedas del robot. La polea del motor tiene que fijarse al eje del motor, mientras que la del eje fijo se deja suelta, para que pueda seguir el movimiento que le marca la polea directora. Ambas poleas se conectan mediante una correa de transmisión, también dentada, que impide que haya deslizamientos entre correa y poleas.

En un sistema de transmisión de tipo oruga no importa dónde se coloquen los motores, ya que gracias a la correa de transmisión, el movimiento marcado por los motores se sigue en las dos poleas de cada lado. Por ello, para mantener el eje de giro en el centro de la estructura y para estrechar convenientemente la misma, se opta por colocar los motores en diagonal, esto es, uno en la parte delantera izquierda y otro en la trasera derecha.

Sobre la base de aluminio a la que se conecta el sistema de tracción, se monta un sistema de pisos que aloja la parte electrónica del robot. Mediante separadores de metal se deja, justo encima de la base, un pequeño espacio para alojar la alimentación del robot, 6 pilas de tamaño AA. Inmediatamente encima, se monta la placa electrónica auxiliar de acondicionamiento, y encima de esta última la placa electrónica que se encarga del procesamiento. Las medidas de la estructura realizada son de 16 cm de ancho por 15 cm de largo y 20 cm de alto.

En las secciones 3.1 y 3.3, se habla en detalle de la construcción de la estructura, el sistema de tracción y los métodos de ajuste de la misma.

### 2.2.2. Motores

Dado que uno de los objetivos del proyecto es desarrollar un robot que permita el desplazamiento por interiores, se requieren motores con suficiente precisión. Los motores empleados en la plataforma robótica son de corriente continua. Por sí solo este tipo de motor no ofrece la posibilidad de conocer la distancia recorrida. Para ello se utilizan *encoders*, que son capaces de medir el número de pulsos que avanza un motor. Con el diámetro de las ruedas empleadas y sabiendo el número de pulsos por vuelta que mide el *encoder*, se puede calcular la relación entre pulsos y distancia, lo que nos dará una medida muy precisa de la distancia que avanza cada motor.

El funcionamiento de los *encoders* se explica en la sección 3.2.2, el cálculo de la relación entre pulsos y distancia se trata en la sección 5.3.1 y la elección de los motores para la estructura y los tipos de motor barajados se explican ampliamente en la sección 3.2.

## 2.3. Electrónica auxiliar

---

La electrónica auxiliar se encarga de varias tareas, como el acondicionamiento de las señales enviadas o recibidas por el robot, la regulación de la tensión de entrada para diversas aplicaciones, o el manejo de los motores. Es, entre otras cosas, una capa intermedia entre los motores y sensores con la electrónica de procesamiento basada en un FPGA (Field Programmable Gate Array).

### 2.3.1. Placa auxiliar

La placa auxiliar empleada se diseña como una placa de circuito impreso. Se encarga de proporcionar la alimentación necesaria tanto a la placa encargada del procesamiento, como a los motores de la estructura, para lo que cuenta con varios reguladores de tensión.

También se encarga de la recepción, la amplificación y la digitalización de las señales de ultrasonidos recibidas de las balizas, que se utilizarán para el sistema de localización, para lo que

cuenta con distintos amplificadores de instrumentación y operacionales. Se ocupa de la recepción de la señal de radio, en la que se codifica el número de baliza emisora y que sirve como origen de tiempos para medir el tiempo de vuelo de la señal de ultrasonidos.

Otra función importante de esta placa es la función relativa a los motores del robot. La placa se encarga tanto de las señales de movimiento del motor, a través de un *driver* que controla los motores, como de las señales que vienen de los *encoders*, adaptando las señales de los mismos a los niveles de tensión que requiere la FPGA.

Además, está pensada para la comunicación inalámbrica entre robots o entre un robot y un ordenador, para lo que cuenta con un módulo Zigbee. Es capaz de detectar objetos cercanos, recibiendo las señales de sensores detectores de obstáculos por infrarrojos. Esto lo realiza tanto con interfaz digital como analógica, gracias al conversor analógico digital incluido.

Aparte de lo mencionado, la placa auxiliar prepara las señales recibidas para la placa encargada del procesamiento, traduciendo las tensiones de las señales recibidas a tensiones aceptadas por la FPGA, para lo que utiliza un adaptador de niveles de tensión. La placa auxiliar ofrece una interfaz con la FPGA a través de un conector de 40 pines.

El funcionamiento de esta placa se explica detalladamente por bloques en la sección 4.3. En dicha sección, se incluyen además los esquemáticos de la placa auxiliar.

---

## **2.4. Procesamiento**

---

El sistema de procesamiento, basado en una FPGA y un microprocesador MicroBlaze, se encarga de tareas fundamentales como el cálculo de la posición del robot, la navegación del mismo, y la detección de obstáculos, de una manera centralizada. Para ello se implementan módulos que realizan tareas independientes de forma paralela.

### **2.4.1. FPGA y MicroBlaze**

La razón de la elección de una FPGA para el procesamiento del robot se debe a la dualidad existente en las necesidades del proyecto. Es decir, por un lado necesitamos disponer de un procesamiento paralelo de señales. De esta manera, el robot puede recibir señales de las balizas emisoras de ultrasonidos, y señales de radio, mientras el usuario se comunica con él desde un ordenador de manera inalámbrica, o se contabiliza el avance de motores gracias a los *encoders*. La parte hardware del proyecto se encarga de este procesamiento paralelo de señales.

Por otro lado, necesitamos procesamiento software, para poder programar los movimientos a seguir por el robot o el método de cálculo de distancias mediante los datos recogidos por el receptor de ultrasonidos o el método de cálculo de distancias con los pulsos de los *encoders*. Esta parte software se encarga de los algoritmos de navegación y del servidor de comunicaciones.

Por todo ello se realiza el diseño en una FPGA, donde se desarrollan periféricos hechos a medida, en lenguaje VHDL, y se utiliza un procesador MicroBlaze.

### **2.4.2. Periféricos**

Se han desarrollado varios periféricos con funciones específicas e independientes. Se realiza una explicación extensa de los mismos en la sección 5.2.

El módulo de comunicación se encarga de la comunicación entre el robot y el ordenador, de manera que se le pueda indicar desde el ordenador la tarea a realizar. Ejemplos de las tareas

disponibles son la solicitud de un movimiento determinado, la consulta de los sensores, o la consulta de posición.

El módulo de motores se ocupa del movimiento del robot. Para ello, recibe del microprocesador órdenes como la velocidad de los motores, la distancia a recorrer para llegar a un punto determinado o el ángulo de giro para orientarse hacia una determinada posición. Además contabiliza los pulsos de los *encoders*, para poder saber la distancia avanzada por los motores.

El módulo de posicionamiento calcula la posición del robot mediante las señales de ultrasonidos y radio que llegan a sus receptores. La señal de radio nos indica el número de baliza emisora, de manera que cuando llega al robot es cuando se toma el instante de inicio para la contabilización del tiempo de vuelo de la señal de ultrasonidos. Sabiendo cuánto ha tardado la señal de ultrasonidos en viajar desde la baliza emisora hasta el robot y utilizando la velocidad del sonido calculamos la distancia a esa baliza con la parte software. Si se repite este método para dos balizas más, con el método de trilateración, se conoce la posición exacta del robot.

El módulo de proximidad comprueba continuamente la existencia de objetos cercanos que puedan obstaculizar el camino seguido por el robot, leyendo la señal de salida de un sensor digital de proximidad por infrarrojos. El procesador detiene el robot cuando se encuentra un obstáculo cerca del mismo.

### **2.4.3. Software**

En la parte software del proyecto se ha implementado un sencillo servidor que espera órdenes de un ordenador. Las órdenes recibidas pueden ser la orientación hacia una determinada posición, el movimiento del robot, o el cálculo de posición del mismo. El software de navegación implementa un sencillo algoritmo de navegación para moverse en línea recta entre dos puntos.

El método de cálculo de distancias o el procedimiento que sigue el robot para alcanzar una determinada posición se explican en los apartados 5.3.1 y 5.3.2.



# 3

## Mecánica y Motores

Este capítulo trata los temas relacionados con la parte mecánica de la plataforma robótica construida. En él podremos ver tanto los componentes elegidos para construcción de la estructura, como su montaje y ajustes. Además, en este capítulo, se abordan asuntos como la elección del sistema de tracción o del tipo de motores.

### 3.1. Estructura del Robot

---

Una parte esencial a la hora de construir un robot es la elección de la plataforma sobre la que se montarán el resto de componentes. Dicha plataforma debe cumplir una serie de requisitos de tamaño, movilidad y tipo de estructura. En este apartado nos centraremos en el cumplimiento de esos requisitos y la descripción de la plataforma desarrollada.

#### 3.1.1. Introducción a la Estructura

Como ya se ha introducido, la estructura robótica para nuestro proyecto debe cumplir una serie de requisitos básicos. Para una mayor claridad los requisitos a cumplir se listan a continuación. La plataforma robótica:

- Debe servir para alojar la parte electrónica en su interior de forma que ésta sea accesible.
- Ha de contar con espacio suficiente para incluir el sistema de alimentación, basado en 6 baterías de tamaño AA.
- Su tamaño tiene que ser suficientemente pequeño para la red definida por las balizas de ultrasonidos.
- Debe contener el centro de masas en su centro geométrico, para facilitar la maniobra de giro.
- Su sistema de tracción tiene que permitir suficiente adherencia con el suelo.
- Tiene que ser fácilmente reproducible, para futuros proyectos.

En un principio se plantean dos posibilidades en el diseño de la estructura: comprar una estructura prefabricada o fabricar una estructura a medida. La opción de la estructura prefabricada cumple de sobra con el último apartado de las características, aunque es más fácil cumplir todos los requisitos con una estructura hecha a medida.

Se opta por revisar una serie de plataformas robóticas comerciales para encontrar una que cumpla nuestros requisitos. La más adecuada de las disponibles es la estructura TRAXSTER II, de RoboticsConnection, ya que es una estructura sólida, con sistema de oruga, lo que implica que el centro de masas se mantiene en el centro geométrico y tiene mayor superficie en contacto con el suelo, que en principio supone una mayor adherencia. Además es fácilmente reproducible y cuenta con espacio suficiente para poder alojar la parte electrónica y la de alimentación. El único inconveniente a priori es su tamaño ligeramente grande, pero no es suficiente como para desechar su uso.

### 3.1.2. Primera estructura propuesta: TRAXSTER II de RoboticsConnection

Como se ha comentado en el apartado anterior, al principio se opta por la compra de una estructura robótica, la plataforma TRAXSTER II de RoboticsConnection, mostrada en la figura 3.1.

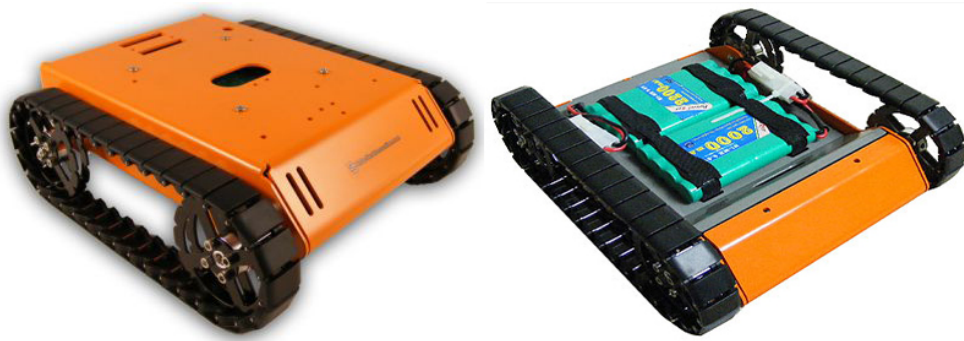


Figura 3.1: Estructura Robótica TRAXSTER II de RoboticsConnection, vistas superior e inferior.

Esta estructura consta de un chasis de aluminio y ruedas de oruga formadas por pequeñas piezas de plástico unidas por trabillas de metal. Las orugas se unen al chasis mediante cuatro ruedas de aluminio dentadas y las ruedas se unen a la estructura mediante cuatro ejes: dos pertenecientes a los motores, colocados en paralelo, y dos independientes, que permiten giro libre.

Con la estructura se incluyen un par de motores de continua con *encoders* en cuadratura integrados. Los motores son de 7,2 V DC con reductora 1:54, que giran a 175 RPM sin carga. La estructura tiene unas dimensiones de 229 mm de largo, 203 mm de ancho y 76 mm de alto.

Una vez recibida la estructura, se procede a su montaje y conexión de motores, que se alimentan para comprobar su correcto funcionamiento.

Durante las pruebas, las piezas de plástico que forman la oruga resultan frágiles. Los enganches de dichas piezas son de plástico, y al estar sometidas a una tensión constante entre las ruedas, algunas piezas se rompen. Además, el plástico de dichas piezas es liso, y no cuenta con ninguna parte de goma, lo que hace que la plataforma pueda resbalar en contacto con otra superficie lisa, como es el suelo. Por otro lado, los motores consumen mucha potencia, e impiden dotar al robot de suficiente tiempo de autonomía. Además, el tamaño de la estructura es ligeramente grande para las celdas de las balizas de ultrasonidos y el espacio para los motores está pensado exclusivamente para los que incluye la estructura, no pudiendo ser sustituidos por otros de menor consumo.



Por todas estas razones, se decide desechar el uso de dicha estructura para el proyecto e intentar conseguir una estructura más flexible, pequeña y económica.

### 3.1.3. Estructura definitiva

Como se necesita una estructura más flexible que la anterior, y las plataformas revisadas no cumplen con los requisitos argumentados en apartados anteriores, se opta por construir una nueva con planchas de aluminio preperforadas. Se elige de nuevo un sistema de ruedas de oruga, para contar con una mayor tracción, más uniforme, y conservar el eje de giro en el centro de la estructura.

En un principio se estudia la posibilidad de colocación de motores en paralelo en la parte delantera de la estructura, mientras que en la parte trasera de la misma se colocan unos ejes que permitan un giro libre a las ruedas traseras. Pero con esta configuración, la estructura tiene que ser suficientemente ancha como para alojar a los dos motores de forma contigua, midiendo al menos 35 cm de ancho, lo que la hace demasiado grande para la red definida por las balizas de ultrasonidos. Esto nos lleva a la solución definitiva, que consiste en colocar los motores en diagonal, es decir, uno en la parte izquierda delantera y otro en la derecha trasera, lo que permite estrechar la estructura convenientemente.

La figura 3.2 muestra un gráfico de las distintas configuraciones y sus respectivos ejes de rotación. Es importante destacar que con la solución de los motores en diagonal, se consigue estrechar la estructura y mantener el eje de rotación en el centro de la misma, lo que es conveniente para sistemas de posicionamiento. Con la nueva configuración, el robot no cambia su posición durante la rotación, ya que el sensor de posicionamiento por ultrasonidos se coloca en el centro del robot, donde se encuentra el eje de giro. Esto dota al robot con una mayor maniobrabilidad.

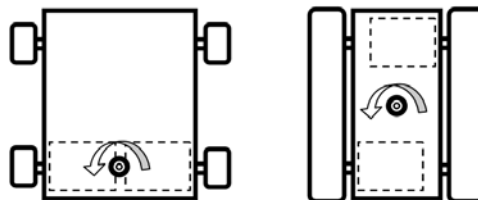


Figura 3.2: Distintas configuraciones de motores en la estructura. Eje de rotación.

Se puede ver el montaje final de la estructura en la figura 3.3. Los dos ejes visibles se utilizan para sujetar las dos poleas libres, mientras que en las piezas sin eje se montan los motores. En la figura 3.5 se aprecia la conexión de los motores en las piezas sin eje, y la colocación de poleas y correas en la estructura.



Figura 3.3: Estructura metálica diseñada. Piezas de sujeción de motores.

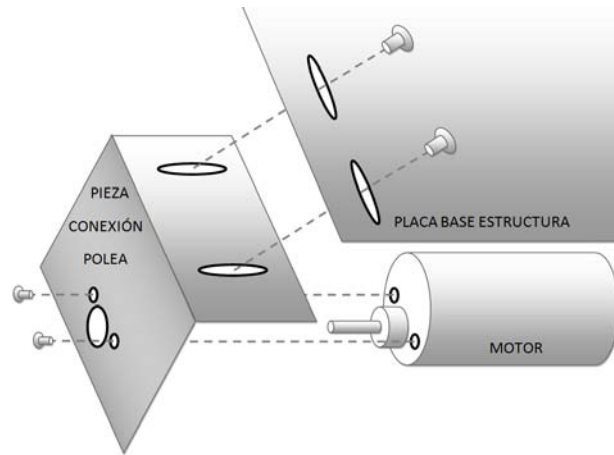


Figura 3.4: Sistema de anclaje de la estructura. Esquema los agujeros de fijación.

Con la configuración definitiva, la estructura alcanza unas medidas de 16 cm de ancho por 15 cm de largo y 8 cm de alto, lo que resulta ser del tamaño preciso para nuestra red, y suficientemente grande como para alojar las placas electrónicas que se encargan de su correcto funcionamiento. Una vez montadas las placas electrónicas, la estructura alcanza los 20 cm de alto.

Para fijar los motores a la estructura creada, se recortan piezas de aluminio cuadradas, con perfil en forma de ángulo recto. Estas piezas son las denominadas "pieza conexión polea" en la figura 3.4. Por la parte estrecha, las piezas se atornillan a la estructura, y por la ancha se fijan los motores. Para ello se hacen agujeros con una taladradora a la medida de los motores o tornillos a utilizar. En concreto, se realizan tres agujeros para las dos piezas que llevan un motor, dos para fijar el motor a la pieza mediante tornillos y tuercas, y uno grande para extraer el eje del motor. A las piezas que no llevan motor se les realiza un agujero, para poder ajustarles un tornillo con el mismo diámetro que el eje del motor, de 6 mm de diámetro, y de esta manera poder acoplar el sistema de tracción en ambos ejes. Este montaje y las piezas de anclaje se observan en la figura 3.5.

Es importante señalar que los agujeros de fijación entre la plancha de aluminio principal y las piezas en ángulo recto de sujeción de motores y poleas, se realizaron con forma rectangular y bordes redondeados, perpendiculares entre sí, para así poder realizar el ajuste con mayor flexibilidad. Se puede ver un esquema de los agujeros en ambas piezas en la figura 3.4

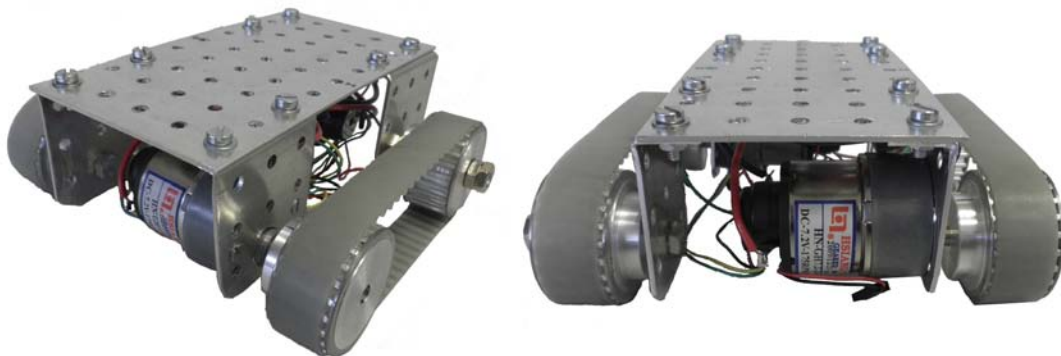


Figura 3.5: Estructura metálica diseñada. Montaje de los motores. Sistema de tracción.

Además, para colocar las placas electrónicas, tanto la placa de electrónica auxiliar como la de procesamiento, que es la que contiene la FPGA, se levanta una estructura de dos niveles, fijada

mediante separadores y una pieza de aluminio diagonal, cortada y perforada a medida, lo que permite la correcta colocación de las placas, con la placa de procesamiento por encima de la placa auxiliar. Además se deja un espacio debajo de las placas para alojar el sistema de alimentación del robot, un bloque de seis baterías de tamaño AA. El sistema de pisos se muestra en la figura 3.6



Figura 3.6: Estructura metálica diseñada. Sistema de niveles para las placas electrónicas.

---

## 3.2. Motores

Los motores son una parte fundamental de nuestra estructura, ya que se encargan del movimiento de la misma. Para aplicaciones de navegación y movimiento por interiores, es esencial que el control de los motores sea suficientemente preciso. Además, los motores elegidos tienen que ofrecer la posibilidad de conocer cuánto se avanza a cada momento con exactitud, para poder sumar la distancia recorrida a la posición inicial y calcular de esta manera la posición final.

Como se ha explicado anteriormente, en este proyecto no sólo se utilizan los *encoders* para conocer la posición del robot, sino que se utiliza el método conocido como *Sensor-Fusion* combinando la información de los *encoders* con el sistema de posicionamiento por ultrasonidos de manera que se tenga una mayor precisión a costa de una cierta redundancia.

Para la elección de los motores se tienen en cuenta dos tipos de motor: los motores paso a paso y los motores de corriente continua. Los motores paso a paso se activan mediante una secuencia de alimentación de bobinas predeterminada y dado que somos nosotros los que controlamos directamente el giro del motor, podemos saber en todo momento la velocidad y distancia recorrida. Los motores de corriente continua por sí solos no ofrecen esa posibilidad, pero añadiendo *encoders* podemos saber con mucha precisión cuánto se están moviendo.

### 3.2.1. Motores paso a paso

Tras una búsqueda de distintos motores comerciales paso a paso, se seleccionan y estudian los distintos modelos pertenecientes a la serie P542-M48 de McLennan, y el modelo MY4001 de ASTROSYN. Se pudo observar su aspecto en la figura 3.7. Además, sus características principales se resumen en la tabla 3.1.

Como puede apreciarse en la tabla 3.1, el eje de los motores seleccionados oscila entre los 4 y 5 mm. Las soluciones ofrecidas por los motores de corriente continua escogidos, tratados en el siguiente apartado, tienen un eje algo más ancho, de 5 a 6 mm. Un mayor ancho de eje en los motores otorga una mayor resistencia a la estructura, ya que al ser el sistema de tracción de tipo

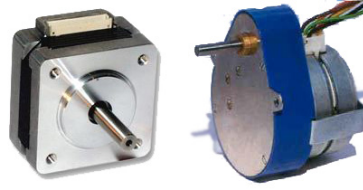


Figura 3.7: Motores paso a paso propuestos. De izquierda a derecha: MY4001 y los motores de la serie P542-M48.

Modelo	Tensión re- comendada (Vdc)	Ancho eje (mm)	Corriente en modo de paso (mA)	Corriente en modo de medio paso (mA)
P542-M482U	12	4	230	480
P542-M481U	5	4	550	1100
MY4001	12	5	750	1500

Tabla 3.1: Comparativa de los motores paso a paso estudiados.

oruga, la tensión de las correas puede provocar una ruptura del eje si este es estrecho. Por lo tanto, es recomendable un mayor ancho de eje.

Además, el consumo de corriente de los motores paso a paso es superior al de los motores de corriente continua, lo que acorta el tiempo de autonomía del robot. Por ambos motivos, se desecha esta solución.

### 3.2.2. Motores de corriente continua

Como se ha explicado anteriormente, el controlador no puede conocer la distancia recorrida por este tipo de motores de una forma directa. Esta distancia debe ser calculada por medio de un sensor que envíe la información pertinente al controlador para que éste pueda calcularla. Para ello, se utilizan los *encoders*. Un *encoder* es capaz de calcular el número de pulsos que avanza el motor, por lo que es importante que éste sea suficientemente preciso. En el mercado se pueden encontrar soluciones de motores con *encoders* integrados, o soluciones de motores con un eje auxiliar para montar un *encoder* externo. A la hora de elegir *encoders* se tuvieron en cuenta ambos tipos. Concretamente, los motores estudiados fueron los siguientes:

- Modelo GHM-04 de Lynxmotion.
- Modelo M12V200 de SolutionsCubed.
- Modelo EMG30 de SuperRobótica.

Se puede observar una fotografía de los motores de continua propuestos en la figura 3.8. Los dos primeros tienen un pequeño eje trasero auxiliar para conectar un *encoder* externo y el último cuenta con un *encoder* integrado.

Para los dos motores sin *encoder*, se compra un *encoder* óptico en cuadratura E4P-100-079-DHTB de USDigital, mostrado en la figura 3.9, con las siguientes características: 100 ciclos y 400 pulsos por vuelta. Dicho *encoder* se instala en la parte trasera de ambos motores, encajando el disco óptico a un pequeño eje trasero auxiliar, creado expresamente para este fin. Este pequeño eje gira a una velocidad mayor que la del eje principal del motor, ya que sigue el movimiento del motor antes de la reductora. Esto implica que el *encoder* contará los pulsos avanzados por el motor sin reductora lo que le dará una gran precisión.



Figura 3.8: Motores de propuestas. De izquierda a derecha: GHM-04, M12V200 y EMG30.



Figura 3.9: Encoder E4P-100-079-DHTB de USDigital.

El funcionamiento del *encoder* se explica de forma gráfica en la figura 3.10. En dicha figura se aprecian las señales devueltas por un *encoder* óptico en cuadratura. La señal de arriba es la del canal A y la de abajo la del B. Como puede apreciarse, ambos canales devuelven la misma señal periódica cuadrada, desfasada  $90^\circ$  entre sí. El sentido de giro del motor se detecta por la secuencia devuelta por los canales del *encoder*. De esta manera, si los motores avanzan, la secuencia periódica obtenida será "10 11 01 00", mientras que si retroceden, será "00 01 11 10". Se pueden apreciar un ciclo, un periodo y un pulso del *encoder* delimitados por líneas discontinuas.

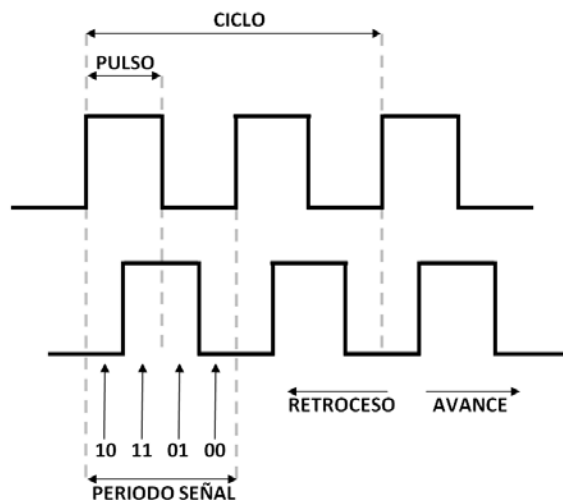


Figura 3.10: Funcionamiento encoder: explicación sentidos giro y ciclo.

Se muestra una comparativa de los motores seleccionados en la tabla 3.2. Comparando esta tabla con la tabla 3.1, en la que se resumen las características principales de los motores paso a paso seleccionados, podemos observar un aumento en el tamaño del eje y un menor consumo energético.

Los motores necesitan una batería que les proporcione la alimentación necesaria. La batería del robot tiene que alimentar tanto los motores como la electrónica necesaria para el desarrollo del mismo. Se ha escogido una batería capaz de proporcionar 7,2 V, formada por seis pilas de tamaño AA y 1,2 V cada una, conectadas en serie. Cabe destacar que pese a que la tensión de funcionamiento en algunos de los motores mencionados es de 12 V, todos funcionan con menor tensión que la recomendada. El introducir una tensión menor afecta a la velocidad que entrega

Modelo	Tensión recomendada (Vdc)	Ancho eje (mm)	Velocidad sin carga (RPM)	Corriente con carga (mA)
GHM-04	7,2	6	175	<556
M12V200	12	6	200	<300
EMG30	12	5	170	<530

Tabla 3.2: Comparativa de los motores de estudiados.

el motor, siendo ésta aproximadamente proporcional a la tensión de alimentación. La tensión mínima de funcionamiento de estos motores de continua se sitúa en torno a los 2-3 V, con lo que funcionan adecuadamente con una batería de 7,2 V.

Se han escogido baterías de níquel-hidruro metálico (Ni-MH) y tamaño AA para la alimentación, por la sencillez de manejo y el peso reducido de las mismas. Se utilizan seis pilas recargables de 1,2 V y 2500 mAh cada una, conectadas en serie. Teniendo en cuenta que el consumo del robot con los motores parados es menor de 250 mA, se tiene una autonomía mayor de 10 horas en ese caso.

Tras estudiar las diferentes características de los motores, se desecha el motor EMG30, debido a que su tamaño es significativamente superior al de los otros dos motores, lo que no permite estrechar tanto la estructura robótica como con el resto. Además, el ancho de su eje es de 5 mm, frente a los 6 mm de los otros dos motores, y como se ha mencionado anteriormente, un eje más ancho proporciona una mayor robustez a la estructura, y reduce la fragilidad de anclaje del sistema de tracción.

Se compran motores de tipo GHM-04 de Lynxmotion y M12V200 de Solutions Cubed. Se alimentan ambos, y se comprueba que los motores M12V200 son bastante más silenciosos que los GHM-04 y tienen menor consumo. Sin embargo, al introducir los motores M12V200 en la estructura y ordenar al robot que avanzara en línea recta, se observa que el robot se tuerce. Esto es debido a que alimentando ambos motores con la misma tensión, los dos giran a distintas velocidades. El problema es fácilmente corregible mediante un ajuste en la modulación por ancho de pulsos o PWM que controla los motores, sin embargo, por sencillez de uso se escogen los motores GHM-04.

### 3.3. Sistema de tracción de la estructura: poleas y correas

El sistema de tracción de la estructura es una parte esencial del robot. Como se ha explicado anteriormente, se escoge un sistema de tracción de tipo oruga, para poder mantener el dentro de giro de la estructura en el centro geométrico de la misma, y conseguir una buena adherencia con el suelo.

Tras los problemas que surgen con la estructura robótica TRAXSTER II de RoboticsConnection y su sistema de orugas compuesto por piezas de plástico frágiles y propensas a la rotura, se decide optar por un sistema de una única pieza y de un material que permita mayor adherencia al suelo.

Esta decisión nos lleva a considerar sistemas de poleas y correas de transmisión. Se encuentran poleas de transmisión de aluminio dentadas, y poleas de goma reforzada con hilos de aluminio, con bordes dentados que se ajustan a la perfección con las poleas. Para que las correas no se salgan de las poleas, las poleas tienen un reborde de aluminio que las sujeta. Al ser dentadas tanto las poleas como las correas, podemos evitar problemas de deslizamiento entre las piezas y obtenemos una mayor precisión en el movimiento.

### 3.3.1. Poleas empleadas

Las poleas son las ruedas de nuestro sistema de tracción. A la hora de escoger el tamaño de las poleas se tiene en cuenta el tamaño del eje del motor, de 6 mm de diámetro. Contando con esa restricción, se escoge la polea de tal manera que tenga un diámetro exterior aproximado de 40 mm, lo que es adecuado al tamaño de nuestra estructura. Además se elige el ancho máximo disponible para una polea de 40 mm de diámetro, para poder colocar una correa lo más amplia posible que logre una buena adherencia a las superficies.

Se ofrece un resumen de las características fundamentales de las correas estudiadas en la tabla 3.3. Todas las poleas son de Syncroflex.

Modelo	Diámetro(mm)	Hueco interior(mm)	Ancho eje(mm)
27T5/25-2	39.95	21	6
27T5/26-2	41.69	21	6
16T2.5/48-0	38.30	10	6
16T2.5/60-0	47.85	10	6
21T5/25-2	39.95	15	6
21T5/26-2	41.60	15	6

Tabla 3.3: Comparativa de las poleas Syncroflex estudiadas.

Analizando las distintas posibilidades, expuestas en la tabla 3.3, se escoge el modelo 27T5/25-2, que nos permite un diámetro de rueda de 40 mm aproximadamente, y un hueco interior para colocar la correa de 21 cm.



Figura 3.11: Poleas de transmisión empleadas en la estructura. Estado original.

### 3.3.2. Correas empleadas

Las correas, combinadas con las poleas de transmisión seleccionadas, forman el sistema de tracción de la estructura. Para escoger las correas, sólo se tienen en cuenta correas de 16 mm de ancho, que es el ancho máximo disponible de correa para el hueco de la polea ya seleccionada, de 21 cm, y se calcula la longitud adecuada de la misma. Para ello se tiene en cuenta la longitud de la estructura ( $l$ ), y el radio de la rueda ( $r$ ), aplicando la siguiente fórmula:

$$longitud_{correa} = 2 \cdot l + 2 \cdot \pi \cdot r$$

Se muestra un esquema que explica el origen de la fórmula en la figura 3.12. En la figura se marcan tanto el radio de las poleas como la longitud entre ejes de la correa.

Trasladando a la fórmula las dimensiones de nuestra estructura y la polea elegida, en milímetros, y teniendo en cuenta que  $2 \cdot \pi \cdot r = \pi \cdot d$ , donde  $d$  es el diámetro de la rueda, se obtiene la longitud de la correa a emplear:

$$longitud_{correa} = 2 \cdot 90 + \pi \cdot 39,95 = 305,5 \text{ mm}$$

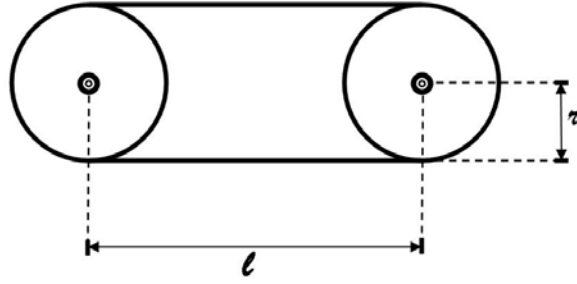


Figura 3.12: Esquema utilizado para el cálculo de la longitud de la correa.  $r$  es el radio de la polea y  $l$  la longitud entre ejes de la correa.

Las longitudes disponibles de correas de 16 mm de ancho ofrecidas por Syncroflex son las expuestas en la tabla 3.4.

Código	Ancho(mm)	Longitud(mm)	Número de dientes
16/T5/395SS	16	295	59
16/T5/305SS	16	305	61
16/T5/330SS	16	330	66

Tabla 3.4: Comparativa de las correas Syncroflex estudiadas.

Tras observar las distintas correas de la tabla 3.4 y teniendo en cuenta que la longitud obtenida en las fórmulas anteriores es de 305,5 mm, se elige el modelo 16/T5/305 SS de 305 mm de longitud, que es el que mejor se aproxima a la longitud teórica calculada. La correa elegida se observa en la figura 3.13.



Figura 3.13: Correa de transmisión empleada en la estructura. Sistema de oruga.

### 3.4. Montaje y ajustes del sistema de tracción

Al recibir las poleas se observa que el reborde metálico de las mismas es bastante largo, tal y como se aprecia en la figura 3.11. Al colocar la correa dentro de la polea, el borde de la polea sobresale por encima de la correa de transmisión. Esta situación provoca que al montar el sistema de poleas y correas en la estructura, la estructura no se apoya sobre el suelo a través de la correa, sino de la polea. El problema se presenta de forma gráfica en la figura: 3.14.

Una primera solución consiste en enviar las poleas a un taller especializado, para que pulan los bordes, dejando el borde mínimo imprescindible para que la correa no se salga. El resultado se aprecia en la figura 3.15.

Otra posible solución es quitar los bordes de las poleas y crear unas nuevas coronas con placas de PCB. Se fabrican dichas coronas diseñando los anillos con el programa Autodesk Autocad y



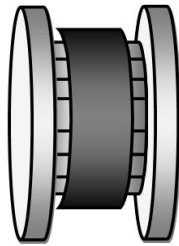


Figura 3.14: Bordes sobresalientes de la polea.

recortándolos con la máquina fresadora del taller de circuitos impresos. Posteriormente se pulen e insertan las piezas en la polea. El resultado se muestra en la figura 3.16, donde se pueden ver las poleas con las coronas de PCB ya montadas y los bordes originales eliminados.

Una vez recortado el borde de la polea, el robot se apoya sobre el suelo a través de las correas en lugar de sobre las poleas, quedando de esta forma solucionado el problema inicial.



Figura 3.15: Poleas con bordes pulidos.



Figura 3.16: Poleas con coronas de placa de PCB, realizadas a medida.

Las poleas se instalan en la estructura de dos maneras:

- Las poleas directoras se conectan directamente con el motor, introduciendo el eje de dicho motor en el agujero de las poleas. Para evitar deslizamientos entre el eje del motor y la polea, y poder dejar fijo el eje del motor a la correa, se introduce una pequeña pieza de goma entre el eje y el agujero.
- Las otras dos poleas tienen libertad de movimiento, y siguen el giro que ordena el motor a través de la correa. Se fijan a la estructura mediante un tornillo de métrica 6 mm y longitud suficiente como para introducir dentro la polea, y se ajustan mediante un sistema de contratuerca que consiste en atornillar dos tuercas en sentidos opuestos, para impedir que se muevan. De esta manera conseguimos que la polea no se salga del tornillo pero le damos suficiente espacio como para que gire libremente.

Una vez definida la estructura del robot, diseñadas las piezas y elegido el sistema de poleas y correas, se montan todos los elementos, y se observa que el avance del robot no es rectilíneo, es decir, con los dos motores girando a la misma velocidad, el robot describe una trayectoria curva.

Este problema se debe a dos variables, que son las siguientes:

- Diferencia de tensión en las correas de transmisión. La correa más tirante retiene parcialmente el giro del motor al que está conectada, y hace que gire más lentamente, lo que deriva en una diferencia de velocidades entre los dos motores.
- Mal ajuste de la estructura, en la que las piezas de sujeción de motores o ejes para las poleas se hubiesen atornillado con una ligera desviación.

Se comprueba que para un correcto ajuste de la estructura es vital que en un mismo lado de la estructura las dos poleas se sitúen exactamente al mismo nivel, lo que se consigue fijando primero una de las poleas, por ejemplo la del motor, y ajustando la altura de la otra mediante un nivel apoyado en la primera, como puede apreciarse en la figura 3.17. Además se asegura que las poleas de diferentes lados se atornillen de manera que estén completamente en paralelo. Otro detalle importante es, que al atornillar la segunda polea de cada lado, se debe dejar la correa suficientemente tensa como para que no se salga de las poleas, pero no demasiado tensa como para dificultar al motor su giro. Además la tensión ha de ser la misma en ambas correas. Esto se logra comprobando que la distancia entre ejes de ambos lados es la misma, como se aprecia también en la figura 3.17

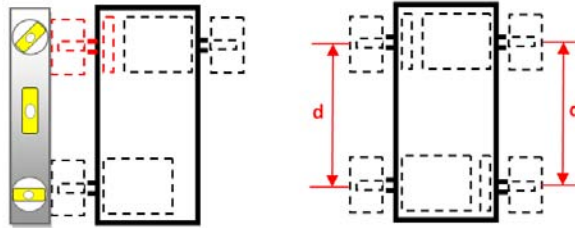


Figura 3.17: Ajustes de la estructura. Nivelación poleas. Misma distancia entre ejes.

Las piezas de anclaje de los motores y los ejes de los mismos son resistentes a la tensión de la correa, es decir, no se doblan cuando la correa está tensa. Sin embargo, las piezas de sujeción de las poleas con giro libre, que no van conectadas a ninguno de los dos motores, se doblan con la tensión de la correa. Este problema se soluciona torciendo ligeramente las piezas de anclaje de las poleas sueltas. La solución del problema se aprecia de forma gráfica en la figura 3.18.

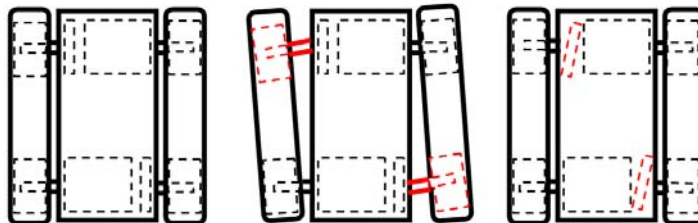


Figura 3.18: Ajustes de la estructura. De izquierda a derecha: situación ideal, situación real, solución al problema.

# 4

## Electrónica

En este capítulo se tratan los temas relacionados con la parte electrónica del proyecto. Para el funcionamiento del robot diseñado se utilizan dos placas electrónicas, una que se ocupa de todo el procesamiento del robot, en la que se encuentra una FPGA, y otra auxiliar que hace de intermediaria entre la FPGA y el resto de componentes. La placa auxiliar se encarga de ajustar los niveles de las señales recibidas o enviadas por el robot y es a la que se conectan los motores y sensores.

Durante el proyecto se han realizado dos placas auxiliares, un prototipo básico realizado mediante la técnica *wrapping* y un diseño definitivo realizado en una placa de circuito impreso. Además, antes de diseñar la placa definitiva, se realiza una placa de control de motores con técnica de circuito impreso. El capítulo se divide en diferentes apartados que tratan cada una de estas placas y explican qué componentes la conforman y su funcionamiento.

### 4.1. Placa inicial de pruebas, técnica *wrapping*

---

#### 4.1.1. Introducción. Técnica *wrapping*

Como un primer acercamiento al proyecto y con el objetivo de comprender los sistemas ya desarrollados por el grupo de investigación HCTLab, se crea un primer prototipo de placa auxiliar. Para la creación de la placa se utiliza la técnica *wrapping*, un sistema que permite construir placas de circuitos electrónicos sin tener que recurrir a un circuito impreso. Esta técnica de creación de circuitos consiste en enrollar los cables alrededor de los pines de los zócalos que contendrán componentes electrónicos con una herramienta específica, para lo que previamente se ha tenido que soldar los zócalos sobre una placa preperforada de fibra de vidrio. La ventaja fundamental de este sistema es que las conexiones entre componentes pueden ser modificadas en cualquier momento, lo que lo hace un sistema ideal para prototipos. En las figuras 4.1 y 4.3 se pueden ver las herramientas necesarias para emplear esta técnica y sus resultados.

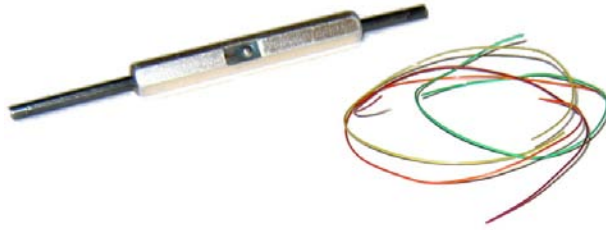


Figura 4.1: Herramientas utilizadas para crear un prototipo de placa con la técnica *wrapping*.

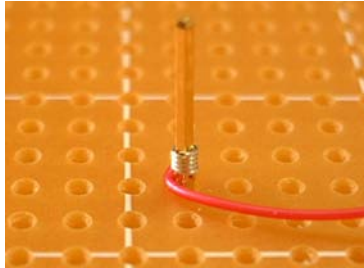


Figura 4.2: Resultado de aplicar la técnica *wrapping* en un pin.

#### 4.1.2. Características

Para el diseño de esta placa auxiliar se reprodujo una placa previamente creada en el grupo de investigación [20]. El sistema previo se encargaba del control de navegación de un nodo móvil en una red de localización por ultrasonidos.

El sistema se dividía en dos placas electrónicas:

- **Placa de acondicionamiento de ultrasonidos:** se encargaba de recibir y acondicionar las señales de ultrasonidos recibidas, amplificándolas y digitalizándolas. Esta placa se conectará a su vez a la placa auxiliar para que adapte las señales al rango admisible por la FPGA.
- **Placa auxiliar:** enviaba a la FPGA las señales de control de los motores y sus *encoders*, la señal de radio y las señales de ultrasonidos que venían de la placa de acondicionamiento de ultrasonidos, previa adaptación de esas señales a los rangos admisibles por la FPGA, es decir, de 0-3,3 V.

Además de estas dos placas, se utilizaba una placa de procesamiento. Ésta se encargaba del control de la posición del robot, su movimiento, y la detección de objetos, comportándose como el núcleo de la lógica del sistema. Procesaba las señales que vienen de la placa auxiliar en la FPGA que contiene.

La placa que se reprodujo como primer acercamiento al sistema, es la placa auxiliar. Más concretamente, esta placa electrónica auxiliar se utiliza para:

- **Adaptar las señales de las balizas de ultrasonidos de 5 a 3,3 V.** Como se ha explicado anteriormente, estas señales provienen ya amplificadas de una placa de acondicionamiento de ultrasonidos. La adaptación es necesaria, ya que las señales de ultrasonidos recibidas, una vez amplificadas y digitalizadas, están comprendidas entre 0 y 5 V y la FPGA admite una tensión máxima de 3,3 V.
- **Recibir la señal de radio.** Esta señal nos sirve de referencia para tomar los datos que provienen de las balizas de ultrasonidos. En ella se codifica el número de baliza que emite

cada vez, para poder identificar las distancias medidas. La señal de radio está comprendida entre 0-5 V, y se adapta al rango 0-3,3V que es el aceptado por la FPGA.

- **Controlar los dos motores conectados con la señal de salida de la FPGA.** Para ello, traduce las señales que le envía la FPGA a los motores, haciendo de intermediaria entre éstos y la FPGA.
- **Leer las señales de datos del *encoder* de uno de los dos motores en la FPGA.** La señal de *encoder* devuelve un número de pulsos por cada vuelta que gira el motor. Contando estos pulsos, sabremos cuántos pulsos se ha movido éste y podremos traducir los pulsos a distancia, teniendo en cuenta las características del sistema de tracción del robot.

La placa electrónica auxiliar consta de los siguientes componentes:

- **Dos chips de cuatro puertas AND de dos entradas, MM74HC08 de Fairchild semiconductor.** Utilizados para convertir las señales de entrada a la FPGA del rango de 0-5 V al rango 0-3,3 V que es el máximo admisible para la misma. Esto se consigue conectando tanto la alimentación del chip como cada una de las entradas de cada puerta AND a 3,3 V. Esto es posible debido a que la tensión máxima admitida en las entradas del chip puede llegar a 5V, cuando la tensión de alimentación del chip es de 3,3 V.
- **Un *driver* de potencia L293 de Texas Instruments.** Para controlar hasta dos motores. El *driver* alimenta los motores a la tensión máxima cuando la FPGA activa las señales correspondientes.
- **Un receptor de radio FM-RRFQ2 con interfaz UART.** Este receptor recoge la señal de radio en la que viene codificado el número de baliza emisora de ultrasonidos. La interfaz UART trabaja a 9600 bits por segundo, con 8 bits de datos, sin bit de paridad, y con un bit de parada.
- **Un regulador de tensión L7805CV de STMicroelectronics a 5 V.** Se encarga de proveer la alimentación necesaria a la placa de procesamiento, y evita tensiones superiores a 5 V que podrían dañar la FPGA.
- **Un conector de cuarenta pines.** Utilizado para conectar la placa auxiliar y la placa de procesamiento y transmitir datos entre ellas.
- **Dos conectores de seis pines (2 x 3).** Para los motores Faulhaber 1624E012S495. Se incluyen dos resistencias de pull-up para los dos canales del *encoder* de uno de los motores.
- **Un conector de tres pines para el receptor de ultrasonidos.** Un pin de 0 V, otro de 5 V, y otro de datos.
- **Un conector de tres pines para el sensor de detección de obstáculos por infrarrojos.** Un pin de 0 V, otro de 5 V, y otro de datos con resistencia de pull-up incluida.
- **Un conector de alimentación de tipo jack.** Encargado de alimentar la placa de procesamiento. Este jack obtiene una tensión de 5 V del regulador de tensión.
- **Un conector de alimentación.** Para esta placa y los motores, al que se conectan unas baterías externas.
- **Varios pines para alimentación de 0, 3,3 y 5 V.**

Se muestran fotografías de esta placa auxiliar en la figura 4.3.

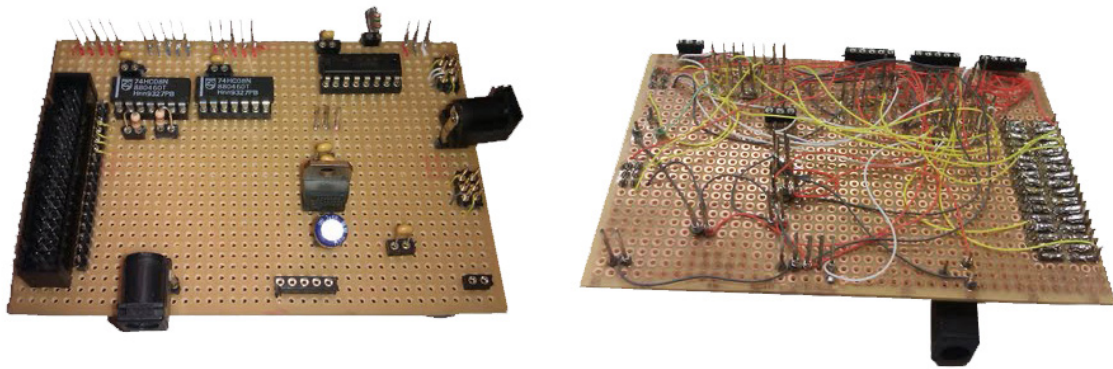


Figura 4.3: Placa auxiliar inicial, sistema de *wrapping*. Vistas delantera y trasera.

#### 4.1.3. Conclusiones

Tras comprobar el correcto funcionamiento de esta placa, el grupo de investigación decide crear otro prototipo de placa. Para ello se abandona la técnica de *wrapping* y se procede a crear un nuevo diseño con los equipos disponibles en el taller de circuitos impresos. El objetivo principalmente es aunar las dos placas auxiliares utilizadas para el sistema de posicionamiento, ya que hasta este momento, para controlar un nodo móvil, se necesitan tres placas: la placa de procesamiento y las dos placas auxiliares comentadas.

De esta manera, y a partir de este momento, para controlar un nodo móvil, sólo se necesitarán dos placas electrónicas, lo que reducirá la complejidad de conexiones. Además, el prototipado de dicha placa, tras superar las pruebas pertinentes, puede ser enviado a una fábrica especializada donde se encargue una solución más definitiva.

## 4.2. Placa de prueba motores, sistema de circuito impreso

---

Previamente al diseño de la placa auxiliar definitiva, y después de realizar la primera placa auxiliar, se decide hacer una placa electrónica de prueba que controle dos motores. Esta placa se diseña con el programa Cadence OrCAD 10.5 y se fabrica con los equipos disponibles en el taller de circuitos impresos.

Se muestra una imagen del equipo utilizado en la figura 4.4, en ella se aprecia la máquina fresadora que se emplea para realizar las placas de circuito impreso. Su modo de funcionamiento consiste en aislar las partes de la placa donde no deba haber cobre para poder formar las pistas entre componentes.

El objetivo de esta placa de prueba es introducir unos nuevos controladores de motores para decidir si utilizarlos con los motores que se han encargado para la estructura robótica y familiarizarse con el diseño y construcción de placas de circuitos impresos (PCB). Para el control de esta placa auxiliar de motores también se utiliza, como placa de procesamiento, la placa comercial Avnet Spartan 3A Evaluation kit.

La diferencia fundamental entre los controladores de motores TB6552FN, utilizado en esta placa de pruebas, y el L293, utilizado en la placa inicial de pruebas, es la tecnología de fabricación, ya que el *driver* de TB6552FN es de tecnología LD MOS, y es más barato que el L293. Además el *driver* TB6552FN de Toshiba, dispone de control de PWM directo, es decir, tiene una entrada



Figura 4.4: Equipo utilizado en la fabricación de placas de circuito impreso.

destinada exclusivamente a una señal de modulación por ancho de pulsos, o PWM, diferenciada de las entradas de alimentación del motor. Esto en principio no supone ninguna ventaja adicional, ya que con el driver L293 también se puede modular la salida con PWM, aunque no disponga de una entrada exclusiva a este fin.

#### 4.2.1. Características

La placa de prueba de motores consta de los siguientes componentes:

- **Un transceptor de bus dual con traducción configurable de tensión y salidas triestado SN74LVCH8T245 de Texas Instruments.** Utilizado para convertir las señales de los *encoders* del rango de 0-5 V al rango 0-3,3 V que es el máximo admisible para la FPGA. De esta manera la FPGA podrá leer los pulsos de los *encoders* en un rango adecuado. El transceptor recibe una alimentación de 3,3 V en un sentido y 5 V en otro, y mediante unas señales de control, traduce las tensiones en el sentido indicado.
- **Un *driver* de potencia para motores, TB6552FN de Toshiba.** Con cuatro puertos, es capaz de controlar hasta dos motores. Este *driver* cuenta con una señal de control directo de PWM, o modulación por ancho de pulsos, pudiendo regular la velocidad de los motores de manera más directa.
- **Un conector de cuarenta pines.** Sirve para conectar la placa de prueba de motores a la placa de procesamiento, para permitir el intercambio de señales entre ambas.
- **Dos conectores de seis pines (2 x 3) para los motores.** Se emplean motores Faulhaber 1624E012S495.
- **Un conector de alimentación tipo jack.** Se encarga de la alimentación de la placa.
- **Protección para la tensión de entrada de los motores.** Formada por ocho diodos, la protección impide que picos de tensión puedan dañar los motores.

Es importante remarcar que para proteger el *driver* de motores de posibles picos de tensión que pudieran dañarlo, se crea una protección que absorba los excesos de tensión, e impida que éstos lleguen al *driver*. Esta protección se logra con el esquema de diodos de la figura 4.6. Además, puede observarse el aspecto final de la placa construida en la figura 4.5 y su esquemático se incluye en la figura 4.6

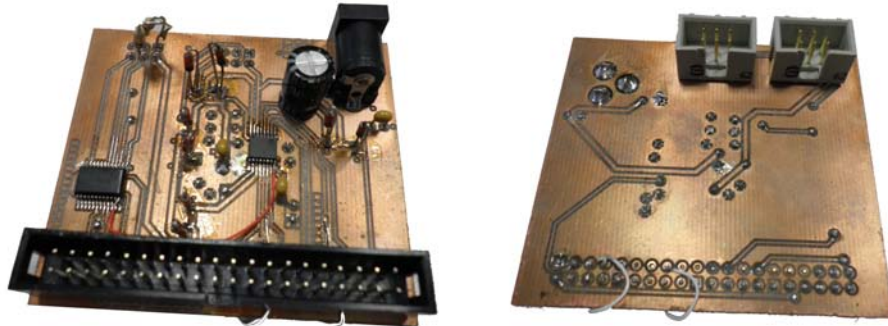


Figura 4.5: Placa auxiliar de motores. Vistas frontal y trasera.

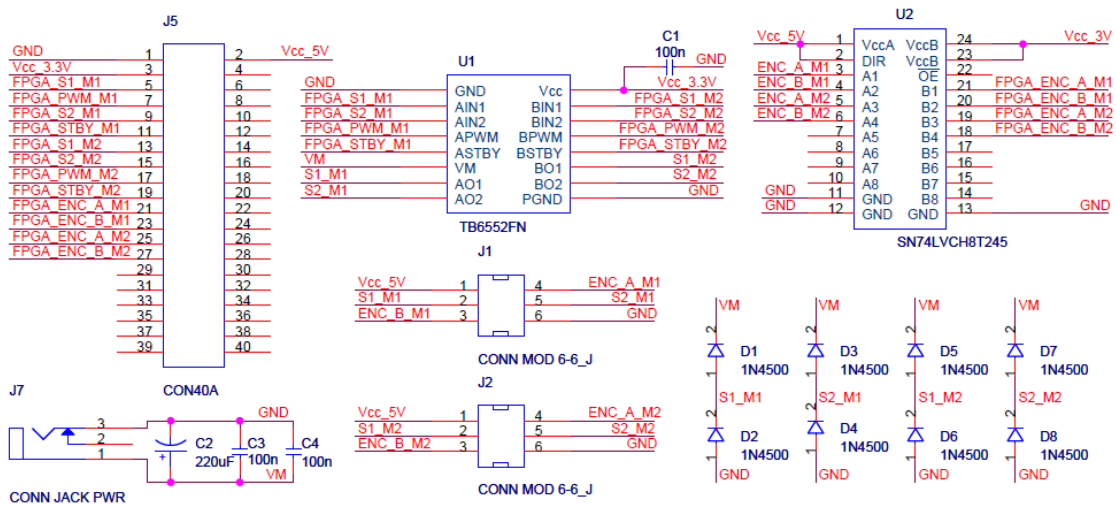


Figura 4.6: Esquemático de la placa auxiliar de motores.



#### 4.2.2. Pruebas realizadas

Una vez creada la placa de motores y soldados sus componentes, se procede a comprobar su correcto funcionamiento. Para ello se hacen pruebas con los motores Faulhaber 1624E012S495 y los motores que incluía la estructura TRAXSTER II de RoboticsConnection.

Mediante el programa Xilinx ISE Design Suite 10.1, se crea un módulo VHDL para controlar los motores, que se carga en la FPGA de la placa Avnet Spartan 3A Evaluation kit, a la que conectamos nuestra placa de prueba de motores. En el módulo diseñado, se hacen varias pruebas en las que se modifican el sentido de giro de los motores y su velocidad mediante modulación por ancho de pulsos (PWM). Además, se hacen girar los motores durante un tiempo prolongado para así observar el comportamiento de la placa.

Las pruebas realizadas determinan que la placa funciona correctamente con los motores Faulhaber. Sin embargo, al probar los motores de la estructura TRAXSTER II, se rompe el *driver* TB6552FN. Esto se debe a que la corriente máxima de salida del *driver* es de 1 A, mientras que la corriente con carga de los motores es de 1,3 A. Por ello, cuando los motores tratan de exigir una corriente mayor de 1 A al *driver*, éste se quema.

Como para la estructura robótica final no se van a utilizar motores de tipo Faulhaber, ya que son muy frágiles y tienen un eje muy estrecho, y se van a utilizar unos motores más parecidos a los de la estructura TRAXSTER II, el grupo de investigación HCTLab se decanta por el uso de otro controlador de motores: L293DD de STElectronics. Estos controladores se venían utilizando en varios proyectos del grupo de investigación con muy buenos resultados, y llevan incluida la protección de diodos que se diseñó para el *driver* TB6552FN.

#### 4.3. Placa definitiva, sistema de circuito impreso

---

Finalmente, en colaboración con otro proyecto[21] del grupo de investigación HCTLab, se diseña una placa definitiva. Para ello se tienen en cuenta los aportes de diseños anteriores y pruebas realizadas. La finalidad de la placa diseñada es proporcionar toda la electrónica auxiliar necesaria para el funcionamiento del robot. Se pueden apreciar las vistas frontal y trasera de la placa diseñada en la figura 4.7.

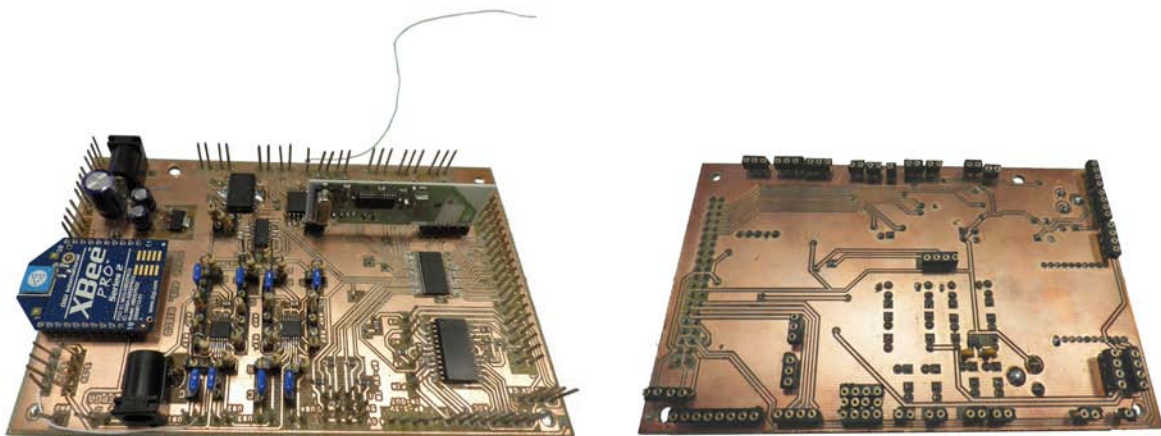


Figura 4.7: Vistas frontal y trasera de la placa auxiliar.

Como un primer acercamiento se describen las características principales, las interfaces y los componentes utilizados. En el siguiente apartado se explica en detalle el funcionamiento de la placa por bloques, y se ofrece una visión de los esquemáticos del diseño.

Las características principales del diseño realizado se han centrado en proporcionar:

- Reguladores de tensión para alimentar toda la electrónica.
- *Drivers* de potencia para el manejo de motores.
- Acondicionamiento de la salida de transductores de ultrasonidos usados como micrófonos, en tres etapas: filtrado, amplificación y digitalización.
- Digitalización de señales analógicas de propósito general.
- Adaptación de señales digitales de propósito general de 5 V a 3,3 V de forma que la FPGA pueda manejarlas.

#### 4.3.1. Características

La placa diseñada ofrece las siguientes interfaces:

- Interfaz de 40 pines compatible con placa comercial Avnet Spartan 3A Evaluation kit para permitir la comunicación directa entre la placa diseñada y la unidad central de procesamiento.
- Ocho pines Analógicos 0-5 V para conversión analógico digital.
- Cuatro pines 0-3,3 V de propósito general para entrada/salida.
- Cuatro pines 0-5 V de propósito general para entrada.
- Cuatro conectores de dos pines para receptores de ultrasonidos.
- Cuatro pines de señales de sensores de ultrasonidos una vez acondicionadas, antes de ser digitalizadas, para depuración de errores.
- Cuatro conectores de dos pines para motores de continua a través de un *driver* de corriente.
- Dos conectores para *encoders*, con resistencias de pull-up incluidas.
- Tres conectores para detectores de infrarrojos con resistencias de pull-up incluidas (1800  $\Omega$ ).
- Conector de alimentación tipo jack (entrada única de alimentación al robot).
- Conector de alimentación tipo jack que ofrece tensiones compatibles con placa comercial Avnet Spartan 3A Evaluation kit.
- Pines para alimentación a 0 V / GND (nueve), 2,5 V (cuatro), 3,3 V (cuatro), 5 V (nueve) para propósito general y ampliaciones, así como alimentación de los *encoders* de los motores (cuatro).
- Cuatro pines de configuración y datos del conversor analógico digital: datos serie de entrada, de salida, reloj y selector de chip.

La lista de componentes más importantes usados es:

- Conversor analógico/digital TLC3548 de Texas Instruments.

- Dos amplificadores operacionales INA2331 de Texas Instruments para amplificación de la señal de ultrasonidos recibida.
- Amplificador operacional TLC2274 de Texas Instruments como comparador para digitalizar las señales de ultrasonidos amplificadas (rango de salida de 0-3,3 V).
- Receptor/emisor Zigbee XBEEPRO2 de Digi International.
- Dos *drivers* de potencia L293DD de STElectronics para manejar hasta cuatro motores, con protección por diodos incluida.
- Controlador SN74LVCH16T245 de Texas Instruments para adaptar las señales a los niveles de tensión máximos de la placa comercial Avnet Spartan 3A Evaluation kit (0-3,3 V).
- Receptor de radio FM-RRFQ2-433 de RFSolutions.
- Reguladores de tensión REG1117-5 a 5 V y TPS73125 a 2,5 V, ambos de Texas Instruments.
- Detectores de obstáculos por infrarrojos GP2D150A de SHARP.

#### 4.3.2. Explicación de funcionamiento por bloques. Esquemáticos

En este apartado se va a explicar por bloques el comportamiento de la placa auxiliar diseñada. Para una visión más global, el esquemático completo de la placa auxiliar definitiva se puede ver en la figura 4.8.

##### Bloque de alimentación

Este bloque se encarga de proporcionar la alimentación necesaria a ambas placas, la auxiliar y la de procesamiento, y los motores, para su correcto funcionamiento. Se muestra el esquemático del bloque de alimentación en la figura 4.9.

El bloque de alimentación cuenta con los siguientes componentes:

- **Un conector de alimentación tipo jack para la entrada de alimentación a la placa auxiliar.**

Este conector (J11) es el encargado de la alimentación de la propia placa auxiliar, y de la placa de procesamiento. A él se conecta la batería, que está formada por seis pilas recargables de níquel-hidruro metálico (Ni-MH), de 1200 mAh. Dicha batería otorga 7,2 V a la placa auxiliar. Esos 7,2 V llegan directamente a los *drivers* de motor, para su alimentación.

Además se hacen llegar esos 7,2 V a cuatro pines (J28), para pruebas de motores o alimentación de componentes externos. Asimismo, la tensión de 7,2 V de entrada se conecta a los reguladores de tensión, para alimentar la electrónica auxiliar y la placa de procesamiento.

- **Regulador de tensión REG1117-5 a 5 V.**

El regulador de tensión (U5), convierte los 7,2 V que tiene a su entrada y que le entregan las baterías mencionadas en el punto anterior, a 5 V. Estos 5 V se utilizan para alimentar la placa de procesamiento, y van tanto al jack diseñado para este fin, como a varios pines de 5 V para alimentación de componentes externos, como por ejemplo, los *encoders* ópticos de los motores.

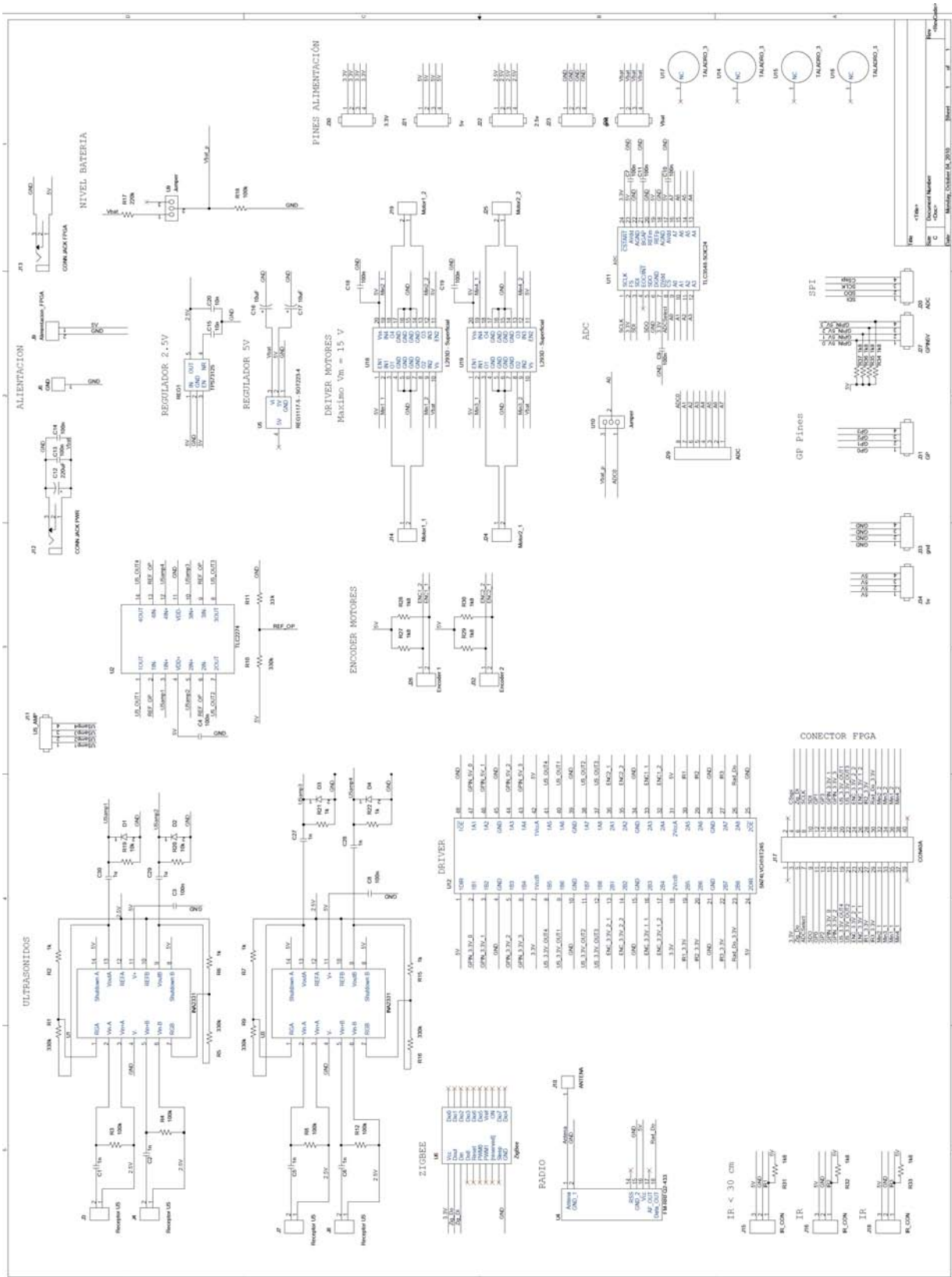


Figura 4.8: Esquemático completo de la placa auxiliar.

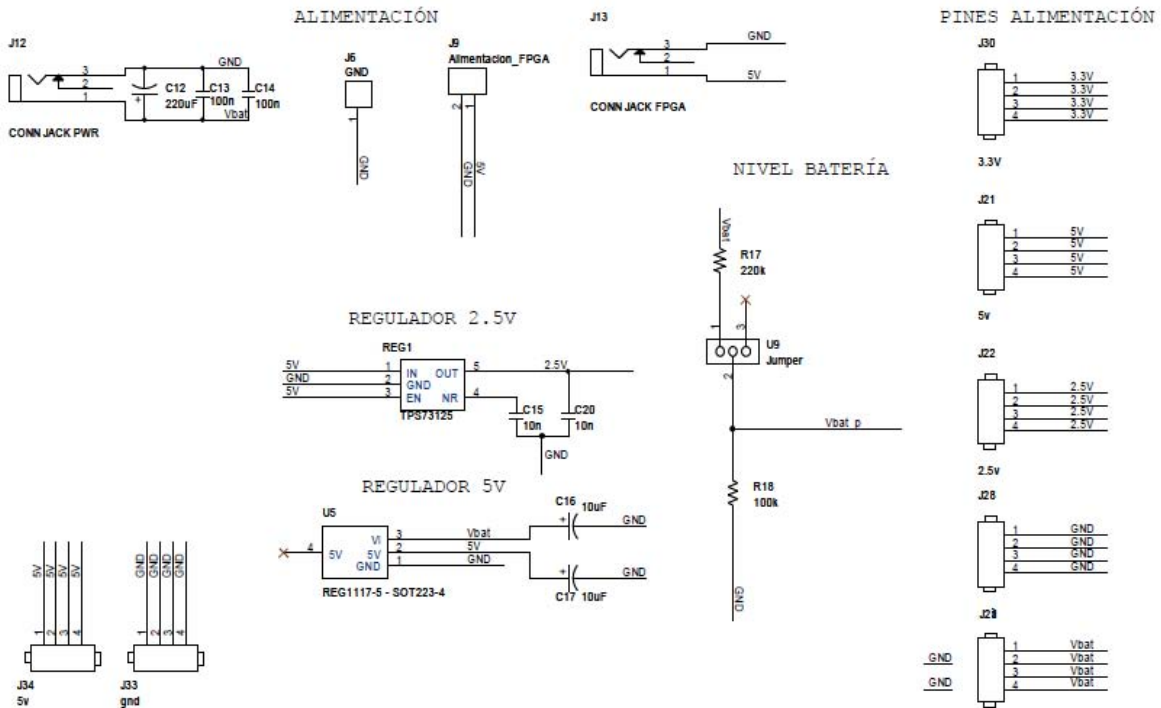


Figura 4.9: Esquemático del bloque de alimentación de la placa auxiliar.

#### ■ Regulador de tensión TPS73125 a 2,5 V.

Este regulador (REG1) de tensión convierte los 7,2 V de las baterías que alimentan la placa auxiliar a 2,5 V. Esos 2,5 V se utilizan como umbral de referencia en los amplificadores operacionales INA2331, que se usan para la amplificación de señales de ultrasonidos.

Además, se hacen llegar estos 2,5 V a cuatro pines (J22), para pruebas o alimentación de componentes externos.

#### ■ Conector de alimentación tipo jack para la alimentación de la placa de procesamiento.

A este conector (J12) llegan los 5 V que provienen del regulador de tensión REG1117-5. Y a él se conecta la placa de procesamiento, para su alimentación.

#### ■ Pines de alimentación a 3,3 V.

La placa de procesamiento tiene un regulador interno a 3,3 V. La salida de este regulador se conecta mediante el conector de 40 pines que une esta placa con la auxiliar. Y estos 3,3 V llegan a cuatro pines de alimentación para pruebas (J30) y a algunas entradas de componentes como el receptor/emisor Zigbee XBEEPRO2, el controlador SN74LVCH16T245, o el amplificador operacional TLC2274.

#### ■ Circuito para conocer el nivel de la batería de alimentación.

Se ha diseñado un circuito que permite conocer el nivel de batería de alimentación de la placa, conectando la tensión de alimentación de la placa auxiliar a la entrada del convertor analógico/digital TLC3548, para ello, se utiliza un divisor resistivo (R17-R18), para que la tensión dividida esté dentro del margen de medición del convertor. Para evitar un consumo innecesario al dejar el divisor resistivo conectado a la tensión de alimentación de las baterías cuando no se desea realizar la medición, y dejar libre dicho canal para conversiones, la conexión entre la tensión de las baterías y dicho canal no es permanente, sino que se

realiza de manera opcional a través de un jumper (U9), o conector externo. Así cuando se quiera comprobar el nivel de batería se deja el jumper conectado, y cuando no nos interese comprobarlo se desconecta.

## Bloque de ultrasonidos

El bloque de ultrasonidos se encarga de la recepción de las señales de ultrasonidos emitidas por las balizas situadas en el techo. El esquemático del bloque de ultrasonidos se encuentra en la figura 4.10.

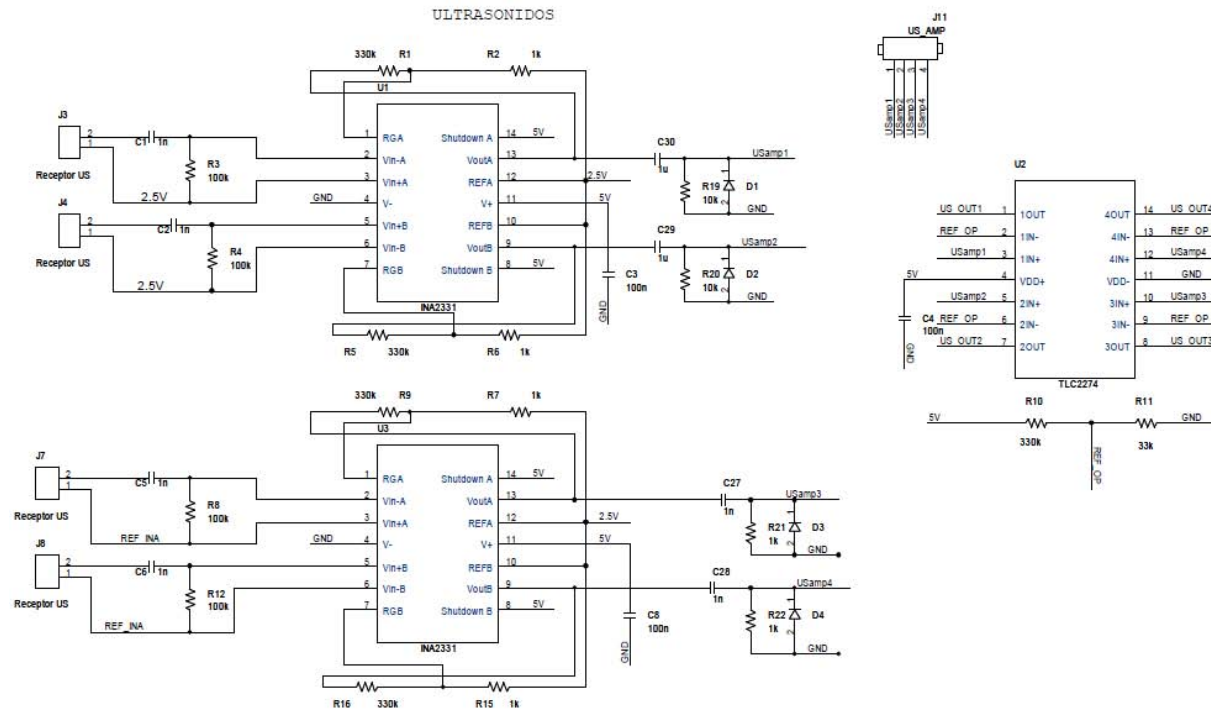


Figura 4.10: Esquemático del bloque de ultrasonidos de la placa auxiliar.

El bloque de ultrasonidos cuenta con los siguientes componentes:

- **Dos amplificadores de instrumentación INA2331.**

Estos amplificadores de instrumentación se encargan de amplificar la diferencia de tensión que genera el sensor receptor de ultrasonidos entre sus pines. Antes de introducir la señal mencionada en el amplificador operacional, pasa por un filtro paso alto para atenuar su componente continua. Y a la salida del amplificador se le vuelve a hacer un filtrado paso alto para eliminar la componente continua. Así a la salida, tenemos la señal recibida por el receptor de ultrasonidos, amplificada y comprendida entre 0 V y 5 V.

- **Cuatro pines de señales de sensores de ultrasonidos una vez acondicionadas.**

Tras la amplificación, la señal comprendida entre 0 V y 5 V se conecta a estos pines (J11), antes de proceder a su digitalización. La finalidad de los pines es la depuración de errores de recepción de ultrasonidos.

- **Amplificador operacional TLC2274.**

Este amplificador operacional se usa como comparador para digitalizar las señales de ultrasonidos amplificados. Para ello contamos con una referencia (REF OP), que alcanzamos con

un divisor de tensión (R10-R11), que determina el nivel diferenciador entre un cero y un uno de una señal digital.

Las señales de salida están amplificadas, digitalizadas y comprendidas entre 0 y 5 V (US OUT1 a US OUT4). Para que se puedan procesar las señales en la FPGA contenida en la placa de procesamiento se necesita un acondicionamiento que las reduzca al rango de 0-3,3 V. Para ello, necesitamos el controlador SN74LVCH16T245. Las señales convertidas a un rango de tensiones adecuado son leídas por la FPGA para tareas de localización del robot.

En este proyecto sólo se utiliza un receptor de ultrasonidos con el robot, sin embargo, la placa auxiliar se ha diseñado de tal manera que tenga hasta cuatro receptores de ultrasonidos para permitir sistemas de localización con un mayor número de receptores.

## Bloque de radio

La señal de radiofrecuencia se envía como una referencia para saber qué baliza de ultrasonidos emite en cada momento. Esta señal se transmite a la velocidad de la luz, y muestra el número de emisor de ultrasonidos operativo. De esta manera se asocia cada señal de ultrasonidos a su emisor para poder calcular las distancias del nodo móvil a cada uno de ellos.

El esquemático del bloque de radio se puede observar en la figura 4.11.

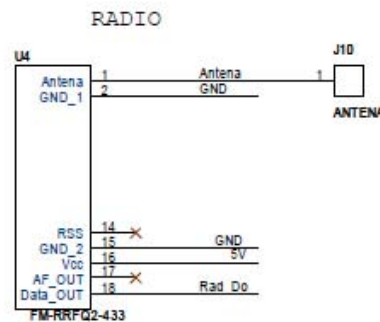


Figura 4.11: Esquemático del bloque de radio de la placa auxiliar.

El bloque de Radio cuenta con los siguientes componentes:

- **Receptor de radio FM-RRFQ2-433.**

Se encarga de la recepción de la señal de radio que se utiliza para sincronizar la emisión y recepción de señales de ultrasonidos. La señal de FM portadora se sitúa en los 433 MHz. En cada señal emitida se especifica el número de la baliza emisora.

La señal de salida (Rad Do) está comprendida entre 0 y 5 V. Para su procesamiento en la FPGA ha de adecuar su rango de tensión al de 0-3,3 V, para lo que se la hace pasar por el controlador SN74LVCH16T245.

- **Antena.**

Conectada directamente al receptor de radio y longitud  $\frac{\lambda}{4}$ , es decir, de 17,3 cm.

## Bloque de motores

El bloque de motores se encarga de todo lo relativo al sistema de tracción del nodo móvil. Tanto del control de las señales que hacen girar los motores, como los *encoders* que nos indican cuántos pulsos se ha avanzado. Se muestra el esquemático del bloque de motores en la figura 4.12.

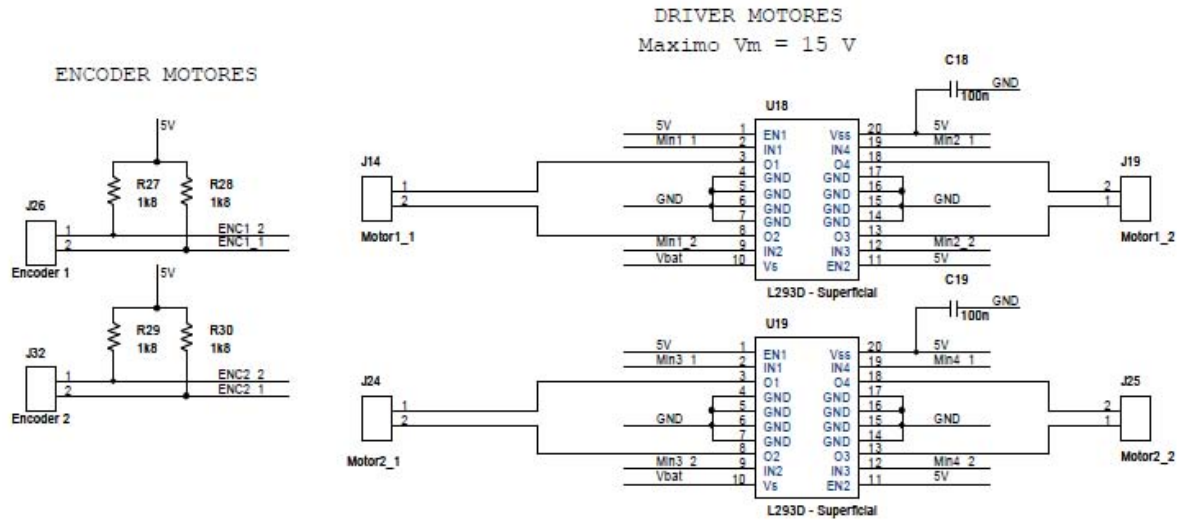


Figura 4.12: Esquemático del bloque de motores de la placa auxiliar.

El bloque de Motores cuenta con los siguientes componentes:

- **Dos *drivers* de motor L293DD.**

Cada controlador es capaz de manejar dos motores. Ambos se encargan de acondicionar la señal que proviene de la FPGA de la placa de procesamiento, para que ésta se adecue a los motores, es decir, que esté comprendida en el rango de 0-7,2 V. Se escogió la versión DD del controlador para evitar que los picos de tensión puedan dañar los motores. En la placa de motores construida se incluyó esta misma protección pero de manera externa, lo que se puede apreciar en la figura 4.6. La protección se explica en el apartado 4.2.1. En este *driver*, la protección viene integrada.

- **Conectores de motor.**

Las salidas de los controladores se conectan a unos pines específicos (J14, J19 y J24, J25), para la conexión de los motores.

- **Conectores de *encoders*.**

Los *encoders* ópticos que se han acoplado a los motores son capaces de decirnos cuánto avanza cada motor y el sentido en el que lo hace. Cada *encoder* cuenta con dos canales, y ambos canales se conectan a entradas de la FPGA contenida en la placa de procesamiento, para su lectura y procesamiento de información. Para ello, el rango de tensión de las señales se convierte de 0-5 V a 0-3,3 V en el controlador SN74LVCH16T245.

Ambos conectores de *encoders* (J26 y J32), cuentan con resistencias de pull-up. El funcionamiento de este tipo de *encoders* se explica en el capítulo anterior. Su esquema de funcionamiento se encuentra en la figura 3.10.



## Bloque de Zigbee

El bloque de Zigbee se encarga de posibilitar la comunicación entre varios nodos o entre el nodo y el ordenador. Gracias a esta comunicación se pueden transmitir órdenes desde el ordenador al nodo, o datos desde el nodo al ordenador. El esquemático del bloque de motores se encuentra en la figura 4.13.

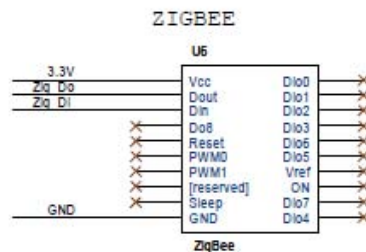


Figura 4.13: Esquemático del bloque de Zigbee de la placa auxiliar.

El bloque de Zigbee cuenta con un sólo componente:

- **Receptor/emisor Zigbee XBEEPRO2.**

En este proyecto se utilizan dos receptores/emisores, uno conectado al robot y otro al ordenador. Se utilizan para poder comunicarnos con el robot desde el ordenador. Ejemplos de estas comunicaciones pueden ser el envío de órdenes al robot, como que avance hasta un punto específico de la red de ultrasonidos, o la recopilación de datos, como la posición exacta del robot en un momento determinado o el número de pulsos avanzados. Los módulos Zigbee empleados disponen de una interfaz serie UART, para comunicarse con la FPGA.

Además, las señales utilizadas ya se encuentran en el rango de 0-3,3 V admisible por la FPGA, por lo que no es necesaria una conversión de tensión.

## Bloque de detección de obstáculos

El bloque de detección de obstáculos se encarga de conectar los receptores de infrarrojos a la FPGA de manera que se pueda detener el robot en caso de posible colisión.

Se puede ver el esquemático del bloque de detección de obstáculos en la figura 4.14.

El bloque de detección de obstáculos cuenta con tres componentes:

- **Tres conectores para sensores de detección de obstáculos por infrarrojos.**

Los conectores (J15, J16 y J18) cuentan con resistencias de pull-up, de 1,8 k $\Omega$ , para el correcto funcionamiento de los sensores. Están diseñados para conectar sensores con salida digital, es decir, la señal de salida se activa sólo cuando se detecta un obstáculo, siendo la salida un uno lógico si lo hay o cero si ocurre lo contrario. La salida del sensor se conecta directamente con la FPGA presente en la placa de procesamiento, para su tratamiento. En el proyecto se han utilizado los sensores GP2D150A de SHARP.

Como la señal de salida de este tipo de sensores está comprendida entre 0 V y 5 V, se conecta al controlador SN74LVCH16T245, para que modifique la señal de manera que esté en un rango de 0-3,3 V y resulte adecuada para la FPGA.

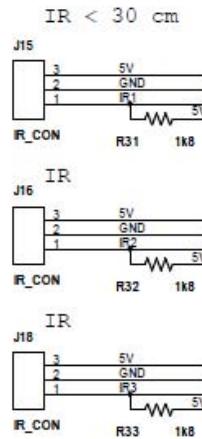


Figura 4.14: Esquemático del bloque de detección de obstáculos de la placa auxiliar.

### Bloque de conexión y acondicionamiento

El bloque de conexión y acondicionamiento se utiliza para acondicionar las señales que se tratan en la FPGA de la placa de procesamiento, y conectar nuestra placa auxiliar a la misma. Se muestra el esquemático del bloque de conexión y acondicionamiento en la figura 4.15.

El bloque de acondicionamiento cuenta con los siguientes componentes:

- **Controlador SN74LVCH16T245.**

Este controlador se utiliza para adaptar las señales a los niveles de tensión máximos de la placa de procesamiento. Concretamente convierte señales comprendidas en un rango de 0-5 V en señales comprendidas en un rango de 0-3,3 V.

Ejemplos de señales que necesitan conversión son las señales de ultrasonidos amplificadas y digitalizadas, las señales de los *encoders* de los motores, las señales de los sensores detectores de infrarrojos, la señal de radio o las señales de los pines de propósito general.

- **Interfaz de 40 pines.**

Esta interfaz (J17) se utiliza para la comunicación entre la placa auxiliar y la placa de procesamiento, de manera que éstas puedan intercambiar señales.

### Bloque de pines de propósito general

Se muestra el esquemático del bloque de pines de propósito general en la figura 4.16.

El bloque de pines de propósito general cuenta con los siguientes componentes:

- **4 pines de entrada/salida de propósito general a 3,3 V.**

Estos pines de propósito general (J31) se pueden utilizar tanto de entrada como de salida. Están conectados a la FPGA de la placa de procesamiento. Un posible uso es como salida de señales internas para su observación en un osciloscopio y posterior depuración.

- **4 pines de entrada de propósito general a 5 V.**

Estos pines (J27) sólo se pueden utilizar como entrada y cuentan con resistencias de pull-up de 1,8 k $\Omega$ . También están conectados a la unidad de procesamiento de datos en la placa de procesamiento. Un posible uso es la conexión de detectores analógicos de infrarrojos adicionales.

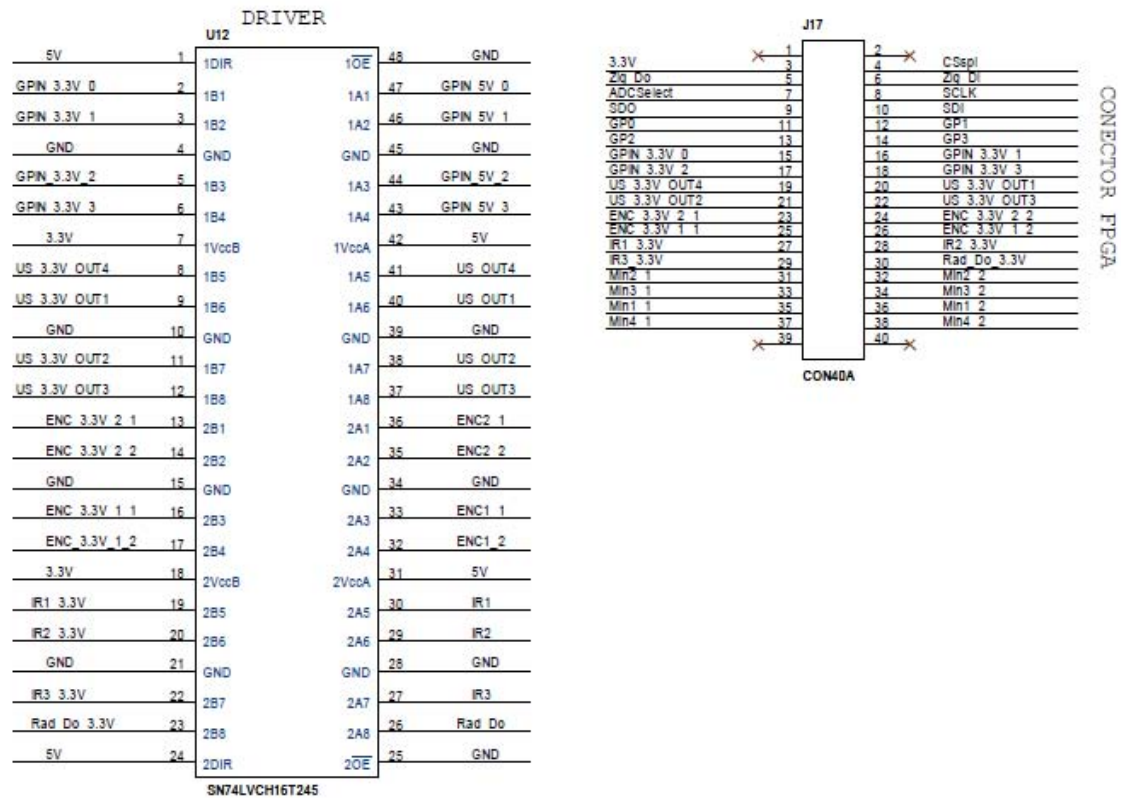


Figura 4.15: Esquemático del bloque de conexión y acondicionamiento de la placa auxiliar.

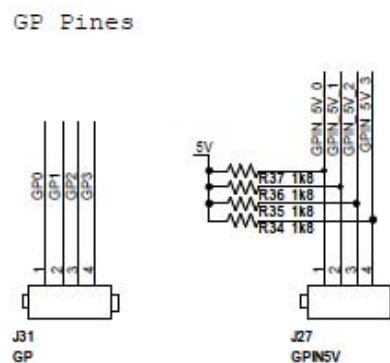


Figura 4.16: Esquemático del bloque de pines de propósito general de la placa auxiliar.

## Bloque de conversión analógico/digital

El convertor analógico digital se utiliza para digitalizar señales analógicas. Uno de sus posibles usos, es la digitalización de señales que puedan provenir de sensores analógicos de detección de obstáculos por infrarrojos. En este proyecto se utilizan únicamente sensores digitales de detección de obstáculos, por lo que el convertor está pensado para posibles ampliaciones. Además de esto, el convertor también se utiliza para medir el nivel de batería del robot, como se comenta en el apartado 4.3.2. El esquemático del bloque de conversión analógico/digital puede encontrarse en la figura 4.17.

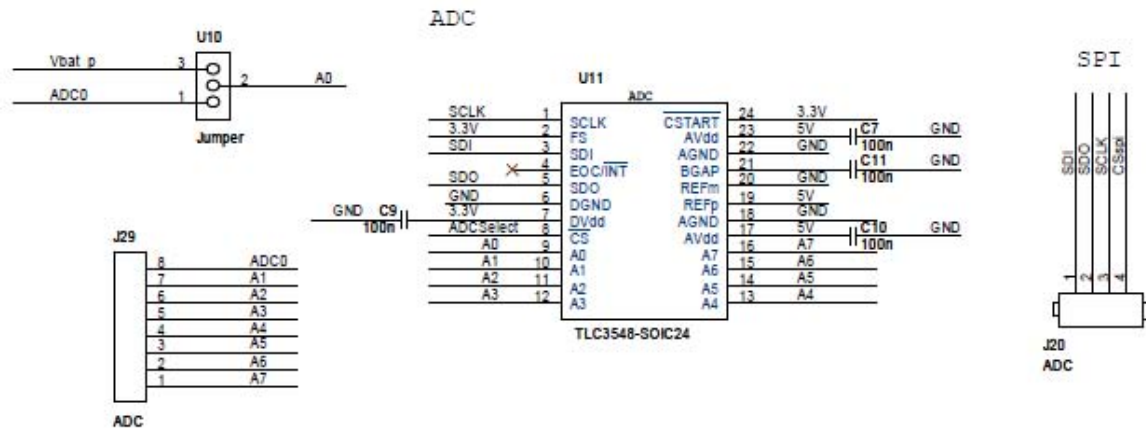


Figura 4.17: Esquemático del bloque de conversión analógico/digital de la placa auxiliar.

El bloque de conversión analógico/digital cuenta con los siguientes componentes:

- **Convertor analógico/digital TLC3548.**

Este modelo es un convertor CMOS de 14 bits de resolución, que tiene un rango de señal analógica de entrada de 0-5 V, y un rango de señal digital de salida de 0-3,3 V. El rango de salida de la señal digitalizada, no hace necesaria la utilización del controlador SN74LVCH16T245, ya que la señal de salida está debidamente acondicionada para la unidad central de procesamiento. Además, el convertor analógico/digital tiene interfaz serie SPI (Serial Peripheral Interface), por lo que la transmisión de datos entre el controlador y el convertor se realiza en serie.

- **8 pines conectados a los canales 1 a 8 del convertor.**

El convertor analógico digital se ha incluido en la placa con múltiples usos futuros. Uno de ellos, es ofrecer la posibilidad de conectar algún sensor analógico, como por ejemplo más sensores de detección de obstáculos por infrarrojos analógicos. Gracias a él se podrían digitalizar las señales que provienen de dichos sensores e interpretarlas posteriormente en la unidad de procesamiento de datos.

El uso del convertor para comprobar el nivel de batería del robot se explica en el apartado 4.3.2.

- **Pines de selección de entrada al canal 0.**

Permiten conectar la tensión de salida de las baterías al canal 0 del convertor analógico digital, para su lectura, o dejarlo libre para realizar medidas sobre una señal analógica externa.

- **Pines de señales del conversor analógico digital.**

Se han conectado las señales de entrada y salida de datos en serie, la de reloj y la de selección de chip a cuatro pines externos para facilitar su lectura y depuración de datos.

#### **4.3.3. Diseño, fabricación y montaje**

El diseño de la placa se realiza con el programa Cadence OrCAD 10.5 y se fabrica con los equipos disponibles en el taller de circuitos impresos. Una vez obtenida la placa de circuito impreso perforada, se procede a soldar todos los zócalos y componentes que contiene. Después de comprobar que no existan cortocircuitos, se alimenta a 7,2 V y se conectan los componentes externos, realizándose comprobaciones de funcionamiento por bloques. Una vez asegurado el correcto funcionamiento de cada bloque por separado se procede conectar la placa auxiliar a la placa comercial Avnet Spartan 3A Evaluation kit y se inician las pruebas de los bloques en conjunto, para lo que se realiza un diseño de pruebas en lenguaje VHDL.

Una vez comprobado que no existen problemas con la placa a nivel hardware, se inicia la etapa de programación del robot, que se explica con mayor profundidad en el capítulo siguiente.



# 5

## Integración y Procesamiento

En este capítulo se van a explicar los asuntos referentes al procesamiento del robot. El centro de procesamiento equivale al cerebro de nuestro robot, y trata temas como el cálculo de la posición del nodo, la navegación del mismo, y la detección de obstáculos, de una manera centralizada. Se va a explicar el diseño implementado dividiéndolo en los módulos que componen el sistema, y que se ocupan de cada tarea de manera independiente.

### 5.1. FPGA y MicroBlaze

---

El procesamiento se basa en dos variantes claramente definidas: procesamiento de señales de forma paralela y procesamiento software. Por este motivo se ha optado por hacer un diseño hardware/software con un microprocesador y varios periféricos. De esta manera, la parte hardware se encarga de realizar el procesamiento paralelo de señales, con los distintos periféricos implementados, y la parte software se encarga del sistema de navegación del nodo.

Debido a que se necesitan periféricos específicos para nuestro sistema y no existen soluciones comerciales aplicables, el diseño se realiza en una FPGA, donde los periféricos se han desarrollado en lenguaje VHDL, y el procesador utilizado es MicroBlaze. A nivel hardware se definen los distintos periféricos que componen el sistema, y se diseña su comportamiento con un lenguaje hardware especializado.

Una FPGA (Field Programmable Gate Array) se trata de un dispositivo semiconductor reprogramable que permite implementar hardware específico mediante un lenguaje de descripción de hardware, como VHDL o Verilog. La principal ventaja del uso de una FPGA es que ésta es fácilmente reprogramable, lo que la hace ideal para el diseño de prototipos.

MicroBlaze es un procesador *softcore* o *Soft Processor*, es decir, un procesador no implementado directamente en silicio, sino descrito en un lenguaje de descripción de hardware, e implementado mediante la lógica reprogramable de la FPGA. Este procesador, desarrollado por Xilinx, es de 32 bits y tipo RISC. Cuenta con una arquitectura de tipo Harvard con buses de 32 bits separados para acceso a datos e instrucciones.

Se ha escogido Microblaze para el diseño móvil por su alto grado de flexibilidad y configuración. Esto es debido a que se pueden añadir periféricos propios o diseñados por Xilinx, lo que simplifica la tarea de programación hardware.

La solución de FPGA elegida para este proyecto es la placa comercial Avnet Spartan 3A Evaluation kit. Se muestra una imagen de la misma en la figura 5.1.

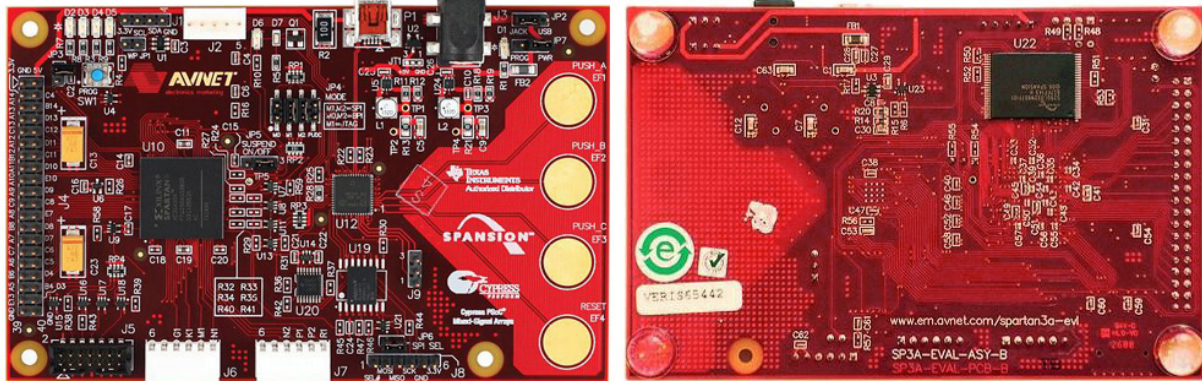


Figura 5.1: Placa comercial Avnet Spartan 3A Evaluation kit. Vistas frontal y trasera.

El procesador es el núcleo del robot, encargándose de forma simultánea de tareas como la localización del nodo en la red, de la detección de obstáculos y de todas las tareas de movimiento del robot. Para ello se ha dividido su diseño en diferentes periféricos, que se detallarán en el siguiente apartado.

## 5.2. Periféricos

Con el fin de diseñar una plataforma versátil, se debe permitir la realización de diferentes tareas en paralelo. Esto es, la comunicación entre el dispositivo y el ordenador no debe interferir en el posicionamiento por ultrasonidos, o las tareas de gestión del motor. Además es recomendable el desarrollo del sistema de tal manera que permita expansiones futuras. Por esta razón se ha diseñado un sistema con un procesador y varios periféricos. El procesador es la unidad principal del sistema, que lleva a cabo tareas de algoritmos tales como la comunicación, navegación y toma de decisiones, mientras que los periféricos realizan simultáneamente el control de los motores, toman muestras de señales de ultrasonidos para el posicionamiento, y leen los valores de varios sensores.

Los periféricos diseñados conforman la parte hardware del sistema. Todos los periféricos se conectan mediante un bus PLB (Processor Local Bus). Se muestra un gráfico explicativo de los periféricos existentes y la comunicación con el procesador en la figura 5.2. En dicha figura podemos ver que el sistema se ha dividido conceptualmente en cuatro periféricos principales. Pese a que el sistema tiene más periféricos, como controladores de memoria, éstos no se añaden para una mayor claridad de conceptos.

- **Módulo de comunicación:** se encarga de comunicar el robot con el ordenador para enviarle órdenes de movimiento o solicitar datos como la posición o el número de pulsos de cada encoder.
- **Módulo de motores:** encargado de las tareas de movimiento del robot.
- **Módulo de posicionamiento:** responsable de ubicar al robot mediante las señales de radio y ultrasonidos.
- **Módulo de proximidad:** comprueba de forma continuada si existen objetos cercanos obstaculizando el avance de nuestro robot.



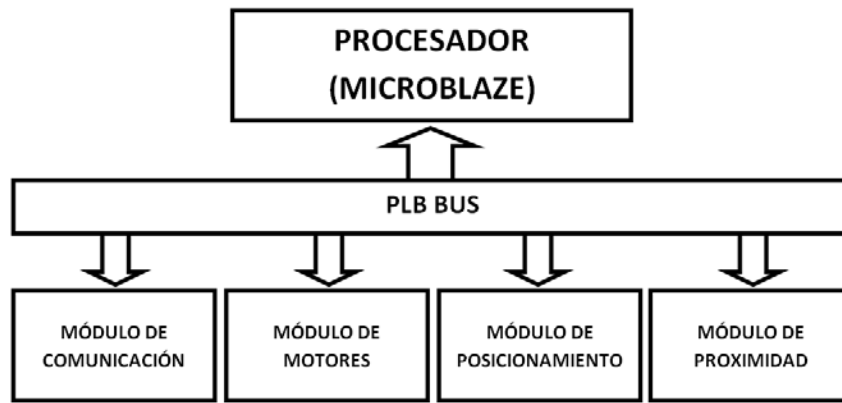


Figura 5.2: Diagrama de los periféricos implementados.

### 5.2.1. Módulo de posicionamiento

En este proyecto se ha partido de un sistema de posicionamiento diseñado previamente en el grupo de investigación HCTLab[20]. El sistema implementado consiste en una serie de balizas emisoras de ultrasonidos situadas en el techo, que emiten una señal de ultrasonidos en instantes determinados de tiempo. Simultáneamente a la emisión de cada señal de ultrasonidos se emite una señal de radiofrecuencia en la que codifica el número de baliza emisora. La señal de radiofrecuencia se utiliza tanto para identificar la baliza emisora como para determinar el instante de emisión de las señales de ultrasonidos y poder contabilizar su tiempo de vuelo. El tiempo de vuelo no es más que el tiempo que transcurre desde que el emisor de ultrasonidos emite la señal hasta que el receptor la recibe. Para calcularlo, se necesita conocer el instante de emisión de la señal de ultrasonidos. Como esto último no es posible, se puede calcular el instante de emisión con el tiempo de recepción de la señal de radiofrecuencia, esto es debido a que la velocidad de la luz es muy superior a la del sonido. El instante que tarda en llegar la señal de radio puede considerarse despreciable en comparación al tiempo de transmisión de la señal de ultrasonidos, tal y como se muestra de manera gráfica en la figura 5.3.

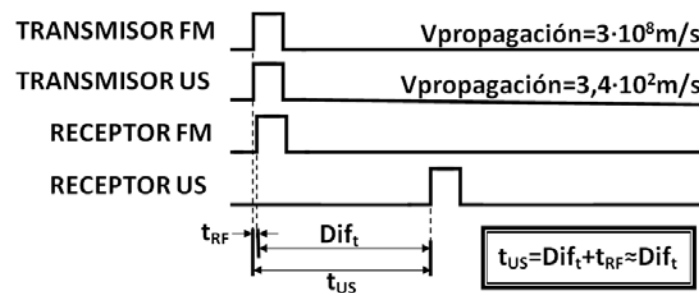


Figura 5.3: Estimación del tiempo de vuelo de la señal de ultrasonidos.

Se muestra un ejemplo de trama de localización en la figura 5.4. El periférico encargado del módulo de posicionamiento se encarga de muestrear las dos señales de la figura, tanto la señal de ultrasonidos como la de radiofrecuencia. Mediante una máquina de estados finitos comprueba la validez de las señales recibidas, además de medir el tiempo de vuelo estimado. Éste guarda los tiempos de vuelo de cada una de las señales emitidas por las balizas de ultrasonidos en una serie de registros. El procesador se encarga de leer estos tiempos y traducirlos a distancias a nivel software.

Una vez calculados los tiempos de vuelo de las señales correspondientes a las balizas emisoras,

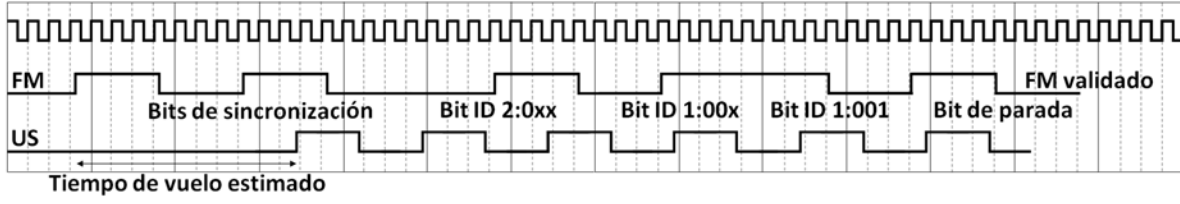


Figura 5.4: Trama de localización.

se utiliza la velocidad del sonido para extraer las distancias del robot a cada una de las balizas del techo. Sabiendo la distancia que separa el robot de una baliza, el robot ha de estar situado en una esfera con un radio igual a la distancia calculada y centro la baliza emisora. Cuando se emplean tres balizas la solución no es más que el punto que cumple las ecuaciones de las tres esferas obtenidas, es decir, el punto de intersección de las mismas.

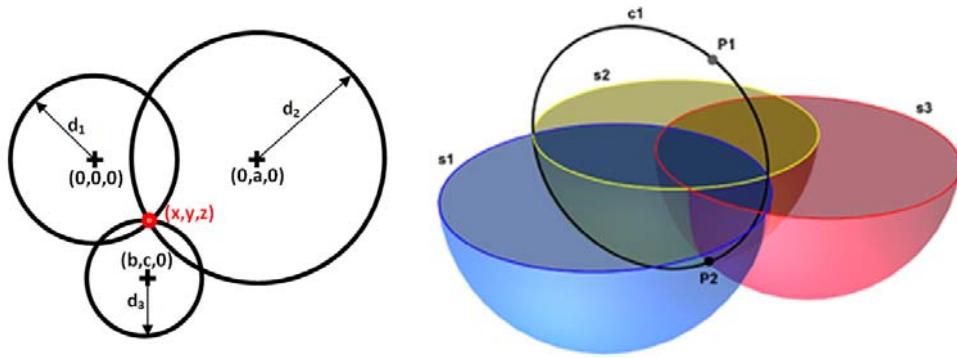


Figura 5.5: Triangulación. Esferas de posición del nodo móvil.

Teniendo tres balizas emisoras, una situada en el punto  $(0,0,0)$ , otra en el punto  $(a,0,0)$  y la última en  $(c,b,0)$ , tal y como puede apreciarse en la figura 5.5, se puede calcular el punto en el que se encuentra el robot  $(x,y,z)$  con las distancias del robot a cada baliza. Cada una de las balizas será el origen de una esfera cuyo radio es igual a la distancia al robot:

$$\begin{aligned} d_1^2 &= x^2 + y^2 + z^2 \\ d_2^2 &= (x - a)^2 + y^2 + z^2 \\ d_3^2 &= (x - c)^2 + (y - b)^2 + z^2 \end{aligned} \quad (5.1)$$

El punto que cumpla las tres ecuaciones será el punto en el que se encuentra el robot. Resolviendo  $x$ ,  $y$ ,  $z$ :

$$\begin{aligned} x &= \frac{d_1^2 - d_2^2 + a^2}{2a} \\ y &= \frac{c^2 + d_1^2 - d_3^2 + b^2}{2b} - \frac{c \cdot x}{b} \\ z &= \pm \sqrt{d_1^2 - x^2 - y^2} \end{aligned} \quad (5.2)$$

Sabiendo que las balizas están situadas en el techo y que el nodo móvil ha de estar situado por debajo de ellas, se elimina uno de los signos de la solución para el eje  $z$ , y hace posible el cálculo de la posición con sólo tres balizas.

### 5.2.2. Módulo de movimiento

El módulo de movimiento se encarga de todo lo relativo al movimiento del robot. Para ello, recibe órdenes de movimiento de parte del microprocesador, configurables tanto en velocidad o distancia a recorrer, e interpreta las señales que devuelven los *encoders*, que sirven para saber el número de pulsos avanzados a cada momento. Todas estas señales se guardan en una serie de registros creados con ese propósito y accesibles por el microprocesador, de manera que el periférico tenga todos los datos disponibles para realizar un determinado movimiento.

Además de encargarse del control de motores, el periférico permite al procesador conocer el número de pulsos que devuelven los *encoders*. De esta forma el microprocesador puede calcular la distancia recorrida y saber en qué posición se encuentra el robot. Aunque el sistema de ultrasonidos también indica al procesador la posición del nodo, la redundancia de información puede ser utilizada para descartar recepciones erróneas de señales de ultrasonidos causadas por objetos que se interpongan en el camino de la señal.

En los siguientes subapartados se explica el funcionamiento de los registros y los bloques implementados a nivel hardware.

#### Registros utilizados

Como se ha explicado anteriormente, en los registros del periférico de movimiento se guardan todos los datos pertinentes para saber el movimiento a ejecutar. Estos datos son los siguientes:

##### ■ REGISTRO 0.

Es un registro de escritura utilizado para almacenar las variables de control. En el primer bit, el 0, tenemos un reset, en los bits 8 y 9 se encuentran respectivamente los valores de start/stop del motor izquierdo y el derecho, y en los bits 16 y 17, están los bits de sentido de los motores izquierdo y derecho.

Más concretamente, el bit de reset se utiliza para poner a cero la cuenta de los *encoders* de ambos motores. Esta cuenta es la que nos dice el número de pulsos alcanzado por cada motor, muy importante para contabilizar el avance o retroceso del robot.

El bit de start/stop de cada motor sirve para iniciar o detener su movimiento, es decir, el microprocesador los activa a uno cuando los motores inician un movimiento y los desactiva, poniéndolos a cero, cuando los motores están parados. Este bit nos sirve para no iniciar una orden de movimiento hasta que el robot no haya finalizado de ejecutar la orden anterior. O por ejemplo no tomar medidas de posición mientras el robot se está moviendo, ya que la precisión del sistema de ultrasonidos disminuye notablemente cuando el nodo permanece en movimiento.

Los bits de sentido indican el sentido de giro de cada motor. El bit 16 indica el sentido de giro del motor izquierdo donde 1 es sentido de avance y 0 de retroceso, mientras que el bit 17 funciona de la misma forma, pero para el motor derecho. De esta manera, cuando el robot necesite avanzar, sentido será "11", si se retrocede será "00", si se realiza un giro a la derecha el sentido será "10", y si se realiza un giro a la izquierda se tendrá "01".

##### ■ REGISTROS 1 y 2.

También de escritura, los registros 1 y 2 contienen la velocidad de movimiento del motor izquierdo y el derecho, respectivamente, en los primeros 8 bits de cada registro. La velocidad se controla mediante modulación por ancho de pulsos o PWM, y este registro contiene un número entre 0 y 255, donde la velocidad máxima es 255.

Como se explicará en apartados posteriores, la velocidad empleada para los movimientos del robot se reduce a la mitad cuando queda poca distancia, en torno a unos 3 cm, para que el robot alcance su objetivo, de manera que el acercamiento se realice de una forma suave y se reduzca la distancia de desaceleración.

#### ■ REGISTROS 3 y 4.

Registros de lectura que almacenan la cuenta de pulsos que indican el *encoder* izquierdo y el derecho. Con este valor somos capaces de calcular cuánto se está moviendo cada motor, y si avanza o retrocede. El tratamiento de los datos obtenidos y cómo se transforman los pulsos en distancia se explicarán en apartados posteriores.

#### ■ REGISTROS 5 y 6.

Ambos de escritura, contienen los pulsos objetivo para el motor izquierdo y derecho. Cada motor avanzará o retrocederá, según marque la variable sentido, hasta que alcance los pulsos que figuran en estos registros.

Se muestra una gráfica explicativa de la función de cada uno de los registros utilizados en la figura 5.6, en ella se puede ver cuántos bits requiere cada señal y cuáles la conforman.

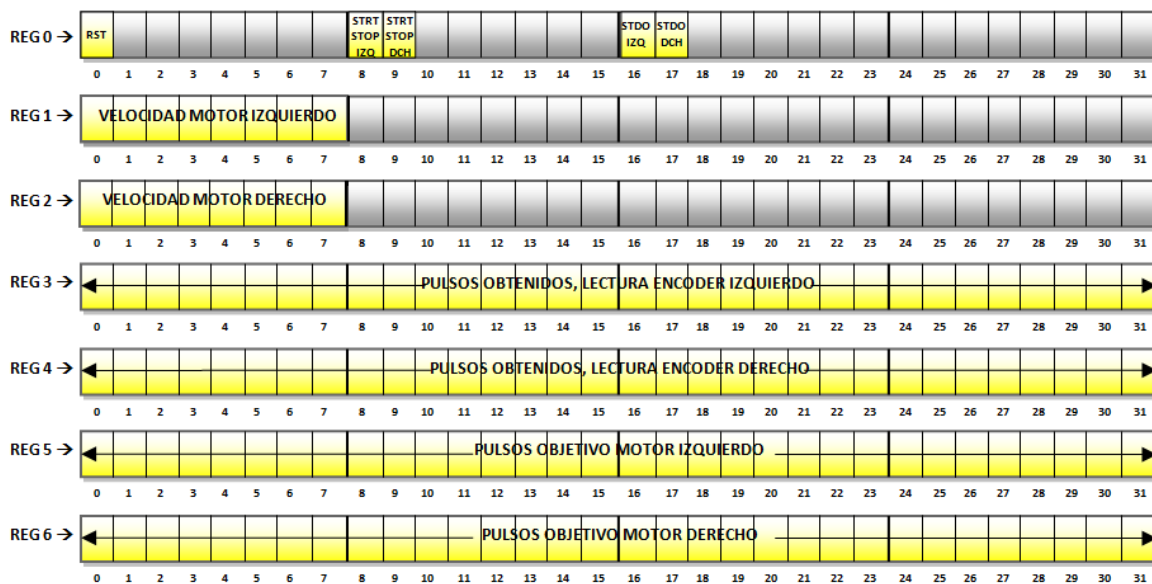


Figura 5.6: Registros utilizados en el periférico de motor y *encoders*.

Un ejemplo completo de utilización de estos registros es ejecutar un movimiento rectilíneo de 200 mm hacia delante. A continuación se definen los parámetros necesarios para la correcta configuración del movimiento. El valor de los registros se expresa en valor hexadecimal. El valor X significa que no importa lo que se escriba en los bits a los que está referido.

Para iniciar el movimiento:

- REGISTRO 0: reset inactivo (bit 0 = 0), orden de avance para ambos motores (bit 8 = 1 y bit 9 = 1), sentido de avance para ambos motores (bit 16 = 1 y bit 17 = 1). No importa el valor del resto de bits.
- REGISTRO 1 = FFXXXXXX. Todos los bits a uno nos proporciona la velocidad máxima para el motor izquierdo.

- REGISTRO 2 = FFXXXXXX. Seleccionamos la misma velocidad en el motor derecho. Con la misma velocidad en los dos motores avanzamos en línea recta.
- REGISTRO 5 = 0000192A. Lo que equivale a que el motor izquierdo tiene que avanzar 6442 pulsos, que se corresponden con 200 mm. Se puede ver la fórmula de conversión de distancia a pulsos en el apartado 5.3.1.
- REGISTRO 6 = 0000192A. Mismos pulsos objetivo para el motor derecho.

Para comprobar que el robot ha avanzado lo que le hemos ordenado, leemos los registros 3 y 4, donde podremos comprobar los pulsos avanzados por el motor izquierdo y derecho respectivamente.

### Bloques hardware implementados

Los bloques hardware son los que definen el comportamiento de nuestro periférico. Son independientes unos de otros y realizan tareas de forma separada. Para el control de movimiento de los motores los bloques que se ejecutan son los siguientes:

- **Bloque para el control de movimiento y parada de los motores.**

Este bloque se encarga de dar orden de movimiento o parada a cada motor. El motor se mueve siempre que su señal start/stop se active por software, y se para siempre que se alcance el número de pulsos deseado, o se activen la señal de reset o parada, también por software.

- **Bloque de generación de interrupciones.**

Se encarga de generar una interrupción cuando se alcanza el número de pulsos objetivo. De esta forma el procesador no tendrá que realizar una espera activa cada vez que se ordene un movimiento, y puede encargarse de tareas simultáneas.

- **Bloque de control de velocidad.**

Este bloque lee la velocidad determinada en los primeros ocho bits de los registros 1 y 2, que el procesador ha escrito previamente, y regula dicha velocidad mediante un PWM de 8 bits de resolución y de 20 kHz frecuencia. Los motores se mueven siempre a la velocidad marcada por su registro correspondiente, hasta que faltan 1200 pulsos para que el robot llegue a su destino, lo que equivale aproximadamente a tres centímetros en distancia. Entonces se reduce esa velocidad a la mitad, para que el robot alcance su destino de una manera más suave. De esta manera se reduce el tiempo de frenado y se evita que los motores avancen más de los pulsos objetivo indicados en los registros 5 y 6.

La modulación por ancho de pulso o PWM consiste en modificar el ciclo de trabajo de una señal periódica cuadrada para controlar la cantidad de energía que le enviamos a los motores. El ciclo de trabajo no es más que el ancho relativo de su parte positiva frente al periodo de la señal. De esta manera se controla la velocidad de los motores, ya que la velocidad de rotación del motor es aproximadamente proporcional a la tensión de alimentación. La modulación por ancho de pulsos permite modular la tensión media que aplica el *driver* de motores.

- **Bloque de lectura de *encoders*.**

Gracias a la correcta interpretación de los datos que aportan los *encoders* tenemos información del movimiento de los motores. El funcionamiento de los *encoders* se explica de manera detallada en el apartado 3.2.2.

Existen dos bloques independientes para los *encoders* de los motores izquierdo y derecho. Cada bloque se encarga de actualizar el valor de los registros 3 y 4 respectivamente, con el valor actual de la cuenta de cada *encoder*. Para ello en cada bloque se traduce los pulsos leídos por el *encoder* en una suma de pulsos positivos o negativos según el sentido de giro de cada motor. Esta traducción se realiza mediante una máquina de estados finita.

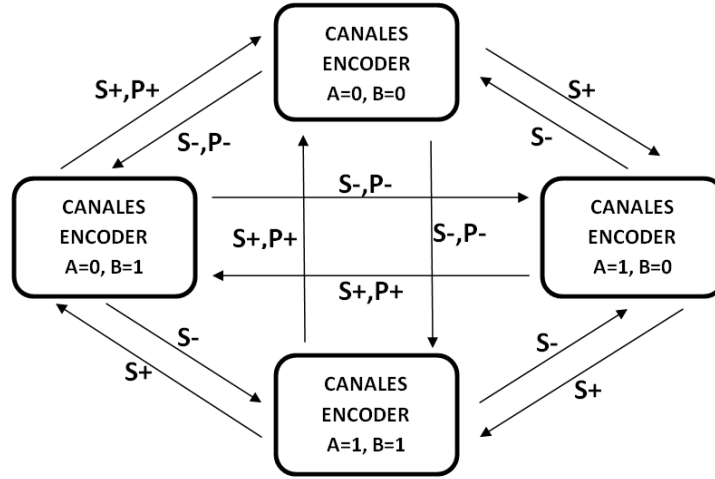


Figura 5.7: Diagrama de estados para la interpretación de los *encoders*.

En la figura 5.7 se presenta el diagrama de estados para el control de los *encoders*. Cada estado se muestra en uno de los cuatro recuadros existentes, y se define por los valores leídos por el *encoder*, siendo A y B los dos canales del mismo. S es el sentido de giro del motor, donde + es avance y - retroceso, y P es la cuenta del número de pulsos del *encoder*. Tanto S como P son las salidas de la máquina de estados finitos. En este caso el estado actual coincide con las entradas anteriores, es decir, si estando en cualquier estado los canales del *encoder*, A y B, devuelven un A=0 y B=0, se pasa al estado A=0, B=0.

Dependiendo de la secuencia que sigan los canales de cada *encoder* se detecta el sentido de giro del motor (las secuencias vienen explicadas en el apartado 3.2.2), más concretamente en la figura 3.10, y cuando se ha completado un ciclo, comprendido por los cuatro estados, se suma o resta un pulso. En la máquina de estados implementada también se tienen en cuenta las situaciones en las que la lectura del *encoder* se saltara un estado, presuponiendo un sentido de giro y sumando o restando el pulso correspondiente.

### 5.2.3. Módulo de detección de obstáculos

El módulo de detección de obstáculos se encarga de comprobar en todo momento si existe un obstáculo cercano al robot. Su propósito es evitar colisiones entre el robot y los objetos cercanos, como por ejemplo paredes. La placa auxiliar está diseñada para utilizar dos tipos de sensores infrarrojos: analógicos y digitales. Los sensores digitales, como por ejemplo los GP2D150A de SHARP, generan una señal binaria de un bit, activada a nivel alto cuando detectan un obstáculo a una distancia máxima de 30 cm, mientras que los sensores analógicos devuelven una tensión variable que indica la distancia al obstáculo.

En este proyecto se han utilizado los sensores digitales GP2D150A de SHARP, figura 5.8. Siempre que los sensores detecten un obstáculo se genera una interrupción que avisa al procesador. El software se encarga de detener los motores cuando salta esta interrupción, para evitar colisiones. La utilización de interrupciones evita que el procesador tenga que estar continuamente comunicándose con el periférico para preguntar si se ha detectado un obstáculo.



Figura 5.8: Sensor detector de infrarrojos digital SHARP GP2D150A.

La placa auxiliar tiene disponible un conversor analógico digital SPI para poder traducir la tensión de los sensores analógicos de infrarrojos. El protocolo SPI es un bus de tres líneas, sobre el cual se transmiten paquetes de información de 8 bits. Dos de estas líneas transfieren los datos, una en cada dirección, y la tercera línea es la del reloj. Cada dispositivo conectado al bus puede actuar como transmisor y receptor.

Aunque no se utilicen sensores analógicos en este proyecto, se diseñó una biblioteca para la utilización del conversor de cara a trabajos futuros. Esta biblioteca se crea para su utilización con el periférico de protocolos SPI genérico de Xilinx, y abstrae el manejo del SPI y de los comandos del conversor. En dicha biblioteca se realizan tareas como la inicialización, donde se configura el dispositivo como maestro, se ajusta el reloj para las conversiones y se desactivan las interrupciones, o la conversión, donde se selecciona el canal de conversión, se configura el tipo de conversión deseado, y se espera el tiempo de conversión para leer el dato convertido.

#### 5.2.4. Módulo de comunicación

El módulo de comunicación permite transmitir datos entre el robot y el ordenador. De esta manera, podemos ordenarle al nodo desde el ordenador la realización de determinadas tareas o solicitarle datos como su posición o el número de pulsos avanzados.

La comunicación entre el robot y el ordenador se realiza mediante dos módulos Zigbee, uno se conecta al PC, y otro al nodo. Los datos se transmiten de manera inalámbrica por Zigbee.

Los módulos Zigbee empleados, Xbee PRO series 2 de Digi International, figura 5.9, proveen una interfaz UART que ofrece una comunicación transparente, dicha interfaz trabaja a 9600 bits por segundo, con 8 bits de datos, sin bit de paridad, y con un bit de parada. El periférico de comunicación mediante UART utilizado viene implementado por Xilinx.



Figura 5.9: Módulo Zigbee empleado: Xbee PRO series 2, de Digi International.

### 5.3. Integración

---

En esta sección se unen la parte hardware y la software para completar el diseño del nodo. Mediante un programa se implementa la parte de navegación, donde es vital el cálculo de distancias, y un servidor para la recepción de órdenes de movimiento por parte del nodo, realizadas desde el ordenador.

#### 5.3.1. Cálculo de distancias

Es importante destacar el método de cálculo de distancias para nuestro robot. Es fundamental calcular la relación entre distancia y pulsos de motor, para poder ordenar al robot el avance de una determinada distancia, o para poder transformar la lectura del número de pulsos de los *encoders* en una distancia física que nos indique cuánto se ha movido el robot. La relación entre pulsos de *encoder* y distancia se calcula a continuación.

La distancia recorrida por cada revolución del motor se puede calcular teniendo en cuenta el radio de la rueda de oruga, de 2 cm en nuestra plataforma:

$$D = 2 \cdot \pi \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot 2 \text{ cm} = 12,56 \text{ cm por revolución}$$

Donde D es la distancia por vuelta, y r es el radio de la rueda de oruga, ambos en centímetros.

El número de pulsos del *encoder* por revolución del motor se puede calcular de la siguiente manera:

$$Pr = Par \cdot Rr = 100 \cdot 50 = 5000 \text{ pulsos por revolución}$$

Donde Pr son los pulsos por revolución del motor, Par los pulsos antes de la reductora, y Rr la relación de la reductora, en este caso 50:1.

El número de pulsos del *encoder* por distancia se puede calcular con la distancia por cada revolución del motor, y los pulsos por revolución:

$$P = \frac{Pr}{D} = \frac{5000}{12,56} = 39,788 \text{ pulsos por cm}$$

Donde P es el número de pulsos del *encoder* por centímetro, Pr es el número de pulsos del *encoder* por revolución y D la distancia por revolución.

Esto significa que el *encoder* entrega 39,788 pulsos cada centímetro, por lo que en un pulso avanza 0,025 cm, que es la resolución del sistema, teniendo en cuenta el tamaño de la rueda y las características de los *encoders*.

La fórmula teórica se utiliza para calcular el número de pulsos necesarios para cubrir una distancia determinada. En la práctica, esta fórmula no obtuvo datos precisos, debido a la complejidad de medir con precisión el radio efectivo de la rueda, ya que el punto de contacto con el suelo cambia dependiendo de las condiciones. Además, la tensión de la correa provoca una retención en los motores. Por todo ello, se ha calculado una fórmula empírica para tener en consideración esos factores.

Para el cálculo de la fórmula empírica, se ordenó al robot avanzar una serie de distancias conocidas, registrando la distancia real que alcanzó. Se observó que para distancias largas, el robot cometió un error constante, mientras que para distancias cortas, en las que el robot no había alcanzado una velocidad máxima, el error dependía de la distancia recorrida. Por lo tanto, la fórmula empírica se dividió en dos partes, una para las distancias largas, en las que se aplica la fórmula de una recta y el error en la distancia se considera una constante, y otra para distancias cortas en las que el error es proporcional a la distancia recorrida. La distancia desde la cual se logra un comportamiento lineal, es de 1,5 cm.



La razón por la cual el error es constante en las distancias largas es que los motores han alcanzado la velocidad final, mientras que si la distancia es corta, los motores se está acelerando todavía.

Por lo tanto, la fórmula empírica tiene la misma estructura en ambos casos:

$$p_{recto} = C \cdot d - e$$

Donde  $p$  es el número de pulsos del *encoder*,  $d$  la distancia objetivo de los motores en milímetros,  $C$  una constante y  $e$  el error de distancia expresado en pulsos.

Finalmente para cada caso:

$$p_{recto} = 39,736 \cdot d - 1505, \text{ si } d \geq 15 \text{ mm}$$

$$p_{recto} = 39,736 \cdot d - (0,2725 \cdot 39,736 \cdot d + 170,13) = 28,908 \cdot d - 170,13, \text{ si } d < 15 \text{ mm}$$

La fórmula se presenta de manera gráfica en la figura 5.10.

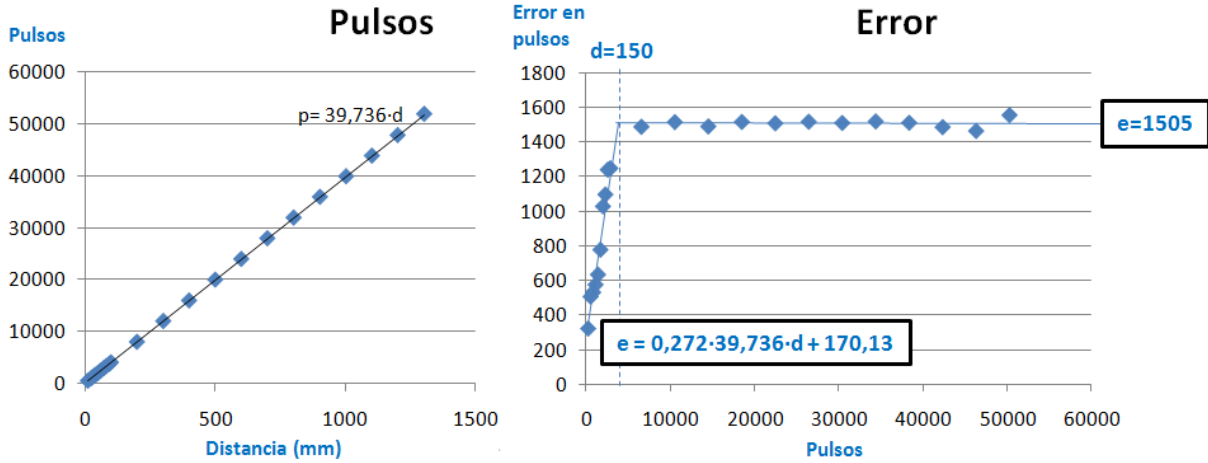


Figura 5.10: Fórmula empírica de conversión de distancia en pulsos.

Se ha seguido el mismo proceso para el cálculo de pulsos correspondientes a los ángulos de giro del robot. Para los giros, la diferencia frente al movimiento en línea recta es que las poleas avanzan en sentidos contrarios. La fórmula empírica calculada tiene la misma forma que para el caso rectilíneo, es decir:

$$p_{giro} = C \cdot d - e$$

Donde  $p$  es el número de pulsos del *encoder* para el caso de giro,  $g$  el giro objetivo de los motores en grados,  $C$  una constante y  $e$  el error de giro expresado en pulsos.

Finalmente para cada caso:

$$p_{giro} = 61,822 \cdot g - 884, \text{ si } g \geq 80^\circ$$

$$p_{giro} = 61,822 \cdot g - (0,1914 \cdot 61,822 \cdot g + 33,401) = 49,990 \cdot g - 33,401, \text{ si } g < 80^\circ$$

Como puede verse en las fórmulas de traducción de grados a pulsos de *encoder*, se ha considerado que es a partir de un ángulo de  $80^\circ$  cuando el error se puede aproximar por un comportamiento lineal, independiente del ángulo de giro.

La fórmula se presenta de manera gráfica en la figura 5.11.

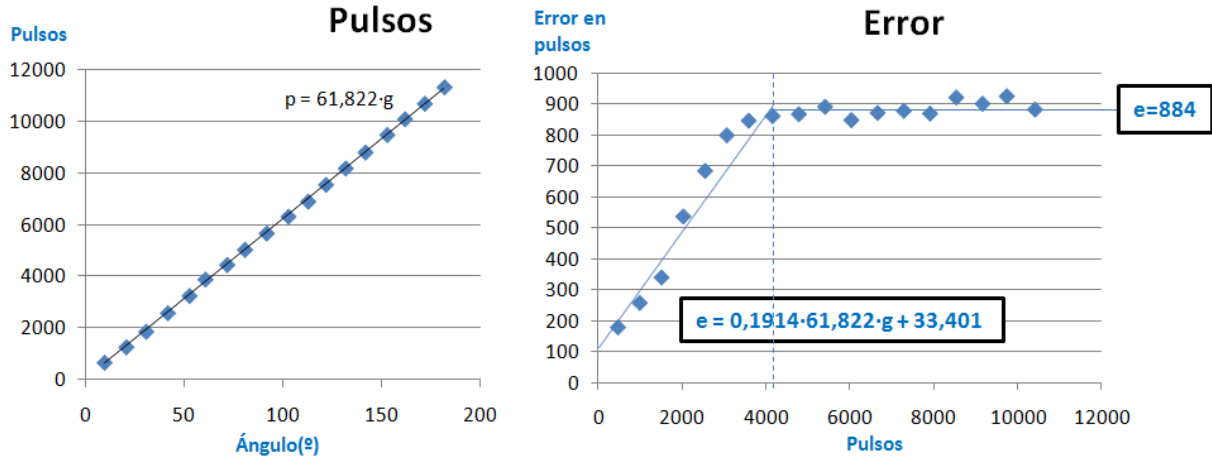


Figura 5.11: Fórmula empírica de conversión de ángulos en pulsos.

### 5.3.2. Software: orientación y navegación

La parte software de nuestro diseño implementa un sencillo servidor que espera órdenes de un ordenador, tales como calcular la posición del nodo, orientarse o moverse a un determinado punto. El software de navegación es el responsable de la lectura de distancias, calculando la posición del robot usando trilateración.

Para realizar cualquier movimiento el robot necesita conocer su orientación. Para ello se sigue un sencillo procedimiento: primero, el robot obtiene su posición mediante el sistema de ultrasonidos  $(x_i, y_i)$ , después avanza una distancia determinada que se calcula con los pulsos de *encoder*. Una vez detenido el robot en la nueva posición, vuelve a localizarse mediante el sistema de ultrasonidos  $(x_f, y_f)$ . Con la posición inicial y la final y la distancia recorrida se aplican fórmulas trigonométricas sencillas para calcular la orientación del nodo en grados. El procedimiento se muestra gráficamente en la figura 5.12

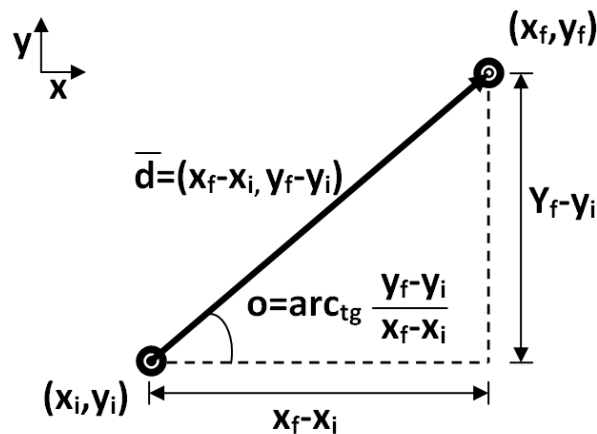


Figura 5.12: Diagrama de cálculo de la orientación del nodo.

Para orientarse, el robot debe recorrer una distancia larga, ya que en distancias cortas, el error de orientación en el posicionamiento es mayor, tal y como puede verse en la figura 5.13. Se ha considerado que 40 cm es una distancia suficientemente larga para la orientación del robot, ya que el error típico del sistema de posicionamiento es de 3 cm, lo que introduce un error de  $4^\circ$

en la orientación. Por tanto, cada vez que el robot avance una distancia mayor de 40 cm, éste se reorienta.

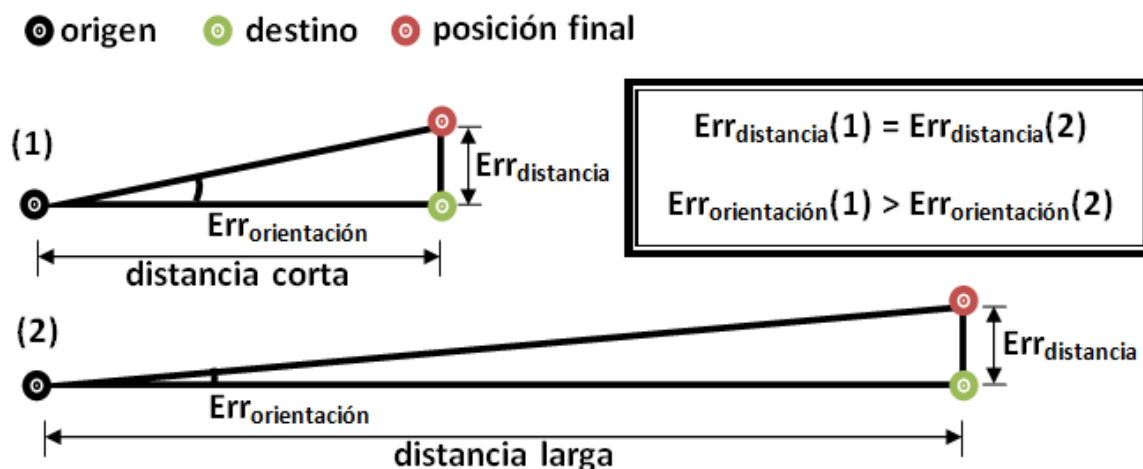


Figura 5.13: Error en la orientación debido al posicionamiento.

Por otra parte, cuando el robot tiene la obligación de ir a una determinada posición, el software se ocupa de todos los cálculos de navegación. En primer lugar, conociendo la orientación inicial, realiza una rotación con el fin de orientar el robot hasta el punto de destino y, a continuación, obtiene la distancia que lo separa de ese punto. Después de eso, calcula el número de pulsos de *encoder* necesarios para la llegada al destino y ordena el inicio del movimiento al periférico de motores. Cuando el número de pulsos del *encoder* ha alcanzado el objetivo, el software vuelve a calcular que la posición del robot utilizando el periférico de posicionamiento. Si la diferencia entre la nueva posición y la posición de destino es mayor que un determinado umbral,  $\pm 5$  cm en nuestro caso, el algoritmo realiza otra iteración para llegar al punto de destino. El algoritmo de navegación se presenta de forma gráfica en la figura 5.14.

Si el periférico de detección de obstáculos detecta un obstáculo durante el movimiento del robot, se envía una interrupción y el software del motor detiene el robot con el fin de evitar cualquier colisión.

Como ya se comentó anteriormente, las órdenes llegan al robot mediante el módulo Zigbee. Desde el ordenador se dispone un menú de opciones tales como obtener la posición del robot, orientarlo, moverlo a un punto determinado, avanzar o retroceder una determinada distancia, o realizar giros. Utilizando el ordenador se le envían datos necesarios para cada orden, como el número de mm a avanzar, o la posición destino, o el ángulo de giro. El software configura el periférico correspondiente con dichos datos.

### 5.3.3. Pruebas realizadas

Se han realizado una serie de pruebas para comprobar el correcto funcionamiento del robot. En ellas se ordena al robot seguir un determinado camino en el que se incluyen tres puntos conocidos, y se mide el error que se comete en cada uno de ellos.

La primera tarea del robot es conocer su orientación. Para ello, desde un punto determinado el robot se localiza por el sistema de ultrasonidos, a continuación avanza 1500 mm, y se vuelve a localizar a 1500 mm de distancia de dicho punto. Con las dos posiciones calculadas, estima el ángulo de orientación origen.

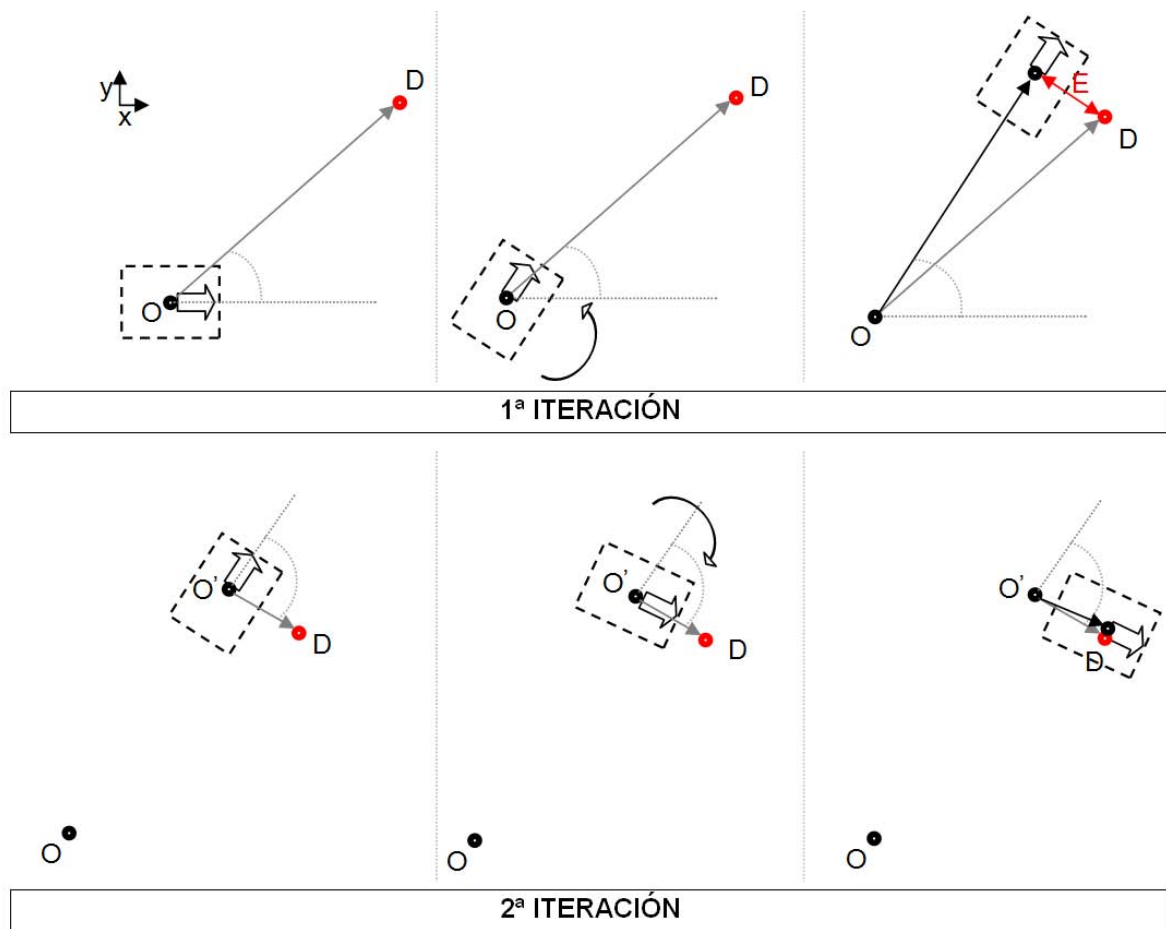


Figura 5.14: Algoritmo iterativo de navegación.

Una vez conocida la orientación del robot, se le ordena avanzar hacia el punto A, desde allí se desplaza hasta el punto B y finalmente se detiene en C. Para cada uno de los tres puntos mencionados se ha medido el error cometido por el robot, tanto en distancia como en ángulo, y el número de iteraciones requeridas. Es importante notar que en las pruebas las posiciones se toman mediante el sistema de posicionamiento por ultrasonidos, lo que introduce un pequeño error en los datos.

Para cada uno de los movimientos del robot, su orientación inicial no está alineada con el punto objetivo, por lo que el robot tiene que hacer una rotación seguida de un avance en distancia. Como se explica en el apartado 5.3.2, si al finalizar el movimiento el robot no se encuentra en la posición requerida con un umbral de  $\pm 5$  cm, éste realizará las iteraciones del algoritmo de navegación necesarias hasta estar dentro de dicho umbral.

El método de cálculo de errores, se muestra en la figura 5.15, donde  $D_x$  es la distancia de error en el eje x,  $D_y$  es la distancia de error en el eje y,  $Err_{distptos}$  es el error de distancia absoluta. Los datos reflejados en los resultados de la prueba son  $Err_{angular}$ , error angular entre la ruta ideal y la ruta real, y  $Err_{distancia}$ , relación entre el error de distancia y la distancia a recorrer por el robot, expresado en tanto por ciento.

El error se calcula respecto al primer movimiento del robot. Si el error es mayor de el umbral de 5 cm definido, el robot realizará iteraciones sucesivas hasta cumplir el umbral. Para cada prueba se representan las gráficas de las nubes de puntos finales alcanzados por el robot, es decir, cumpliendo el umbral definido.

Como se ha explicado anteriormente, en el experimento, el error de distancia se ha calculado utilizando el sistema de ultrasonidos, el cual tiene un error promedio de 43,55 mm y una desviación estándar de 51,02 mm [22].

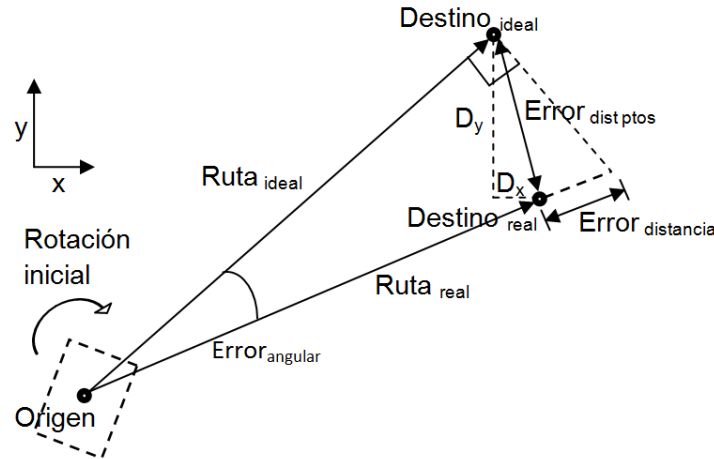


Figura 5.15: Esquema de medición de errores. Caminos ideal y real.

### Primera prueba

Los puntos para esta primera prueba son: A (1542, 1522), B (878, 800), C (560, 2140). El itinerario seguido por el robot se aprecia en la figura 5.16. Los resultados de error y el número de iteraciones para cada punto del trayecto se muestran en la tabla 5.1.

Se muestra una gráfica con los puntos alcanzados por el robot durante la prueba en la figura 5.17.

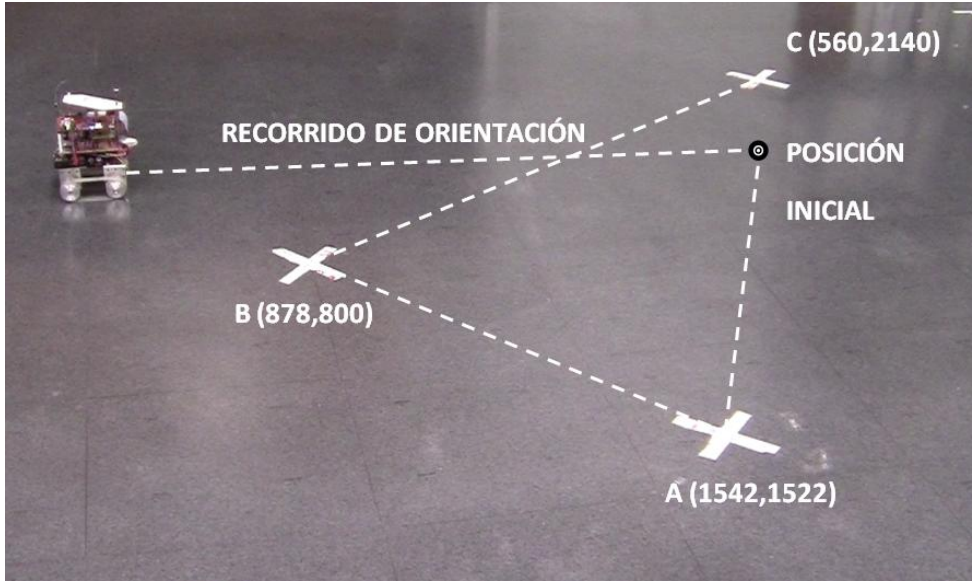


Figura 5.16: Prueba 1. Ruta realizada por el robot. Puntos de medida de posición.

Prueba	punto A			punto B			punto C		
	$Err_{dist}(\%)$	$Err_{ang}(^{\circ})$	n° it	$Err_{dist}(\%)$	$Err_{ang}(^{\circ})$	n° it	$Err_{dist}(\%)$	$Err_{ang}(^{\circ})$	n° it
1	1,049	1,023	1	4,992	10,532	3	0,637	1,165	1
2	5,182	20,09	2	7,035	7,915	2	0,317	15,092	2
3	1,096	4,981	2	5,260	11,545	2	2,904	11,387	2
4	4,035	3,014	2	8,562	5,913	2	1,388	17,198	3
5	0,160	2,505	1	4,674	8,390	2	0,116	13,295	2
6	2,178	2,171	1	4,334	8,543	3	2,076	4,611	2
7	3,830	3,357	1	4,426	9,510	2	0,347	9,044	2
8	2,864	2,375	1	3,566	10,617	2	0,408	13,066	3
9	2,592	2,374	1	1,949	11,075	2	0,596	9,202	3
10	1,113	1,328	1	4,635	12,358	3	0,333	8,441	2

Tabla 5.1: Prueba 1 del sistema desarrollado. Error en distancia y ángulo. Número de iteraciones necesarias.

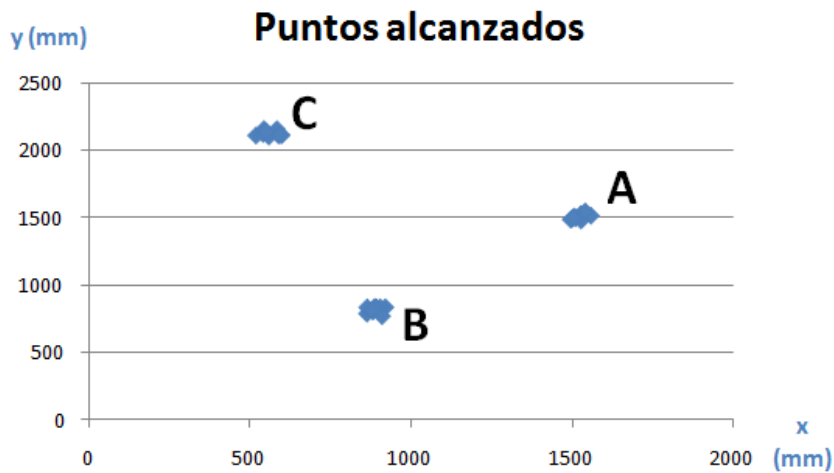


Figura 5.17: Puntos alcanzados por el robot durante la prueba 1.

## Segunda prueba

Los puntos para esta segunda prueba son: A (600, 1445), B (1700, 2470), C (1600, 775). El itinerario seguido por el robot se aprecia en la figura 5.18. Los resultados de error y el número de iteraciones para cada punto del trayecto se muestran en la tabla 5.2.

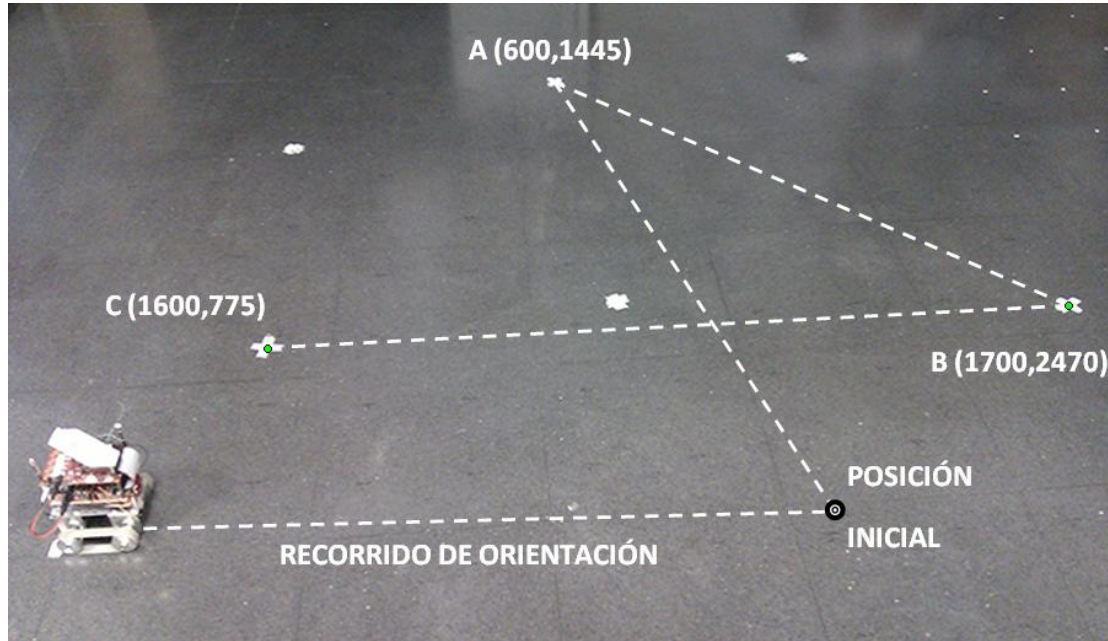


Figura 5.18: Prueba 2. Ruta realizada por el robot. Puntos de medida de posición.

Prueba	punto A			punto B			punto C		
	<i>Err<sub>dist</sub></i> (%)	<i>Err<sub>ang</sub></i> (°)	n° it	<i>Err<sub>dist</sub></i> (%)	<i>Err<sub>ang</sub></i> (°)	n° it	<i>Err<sub>dist</sub></i> (%)	<i>Err<sub>ang</sub></i> (°)	n° it
1	2,37	4,520	1	1,799	10,179	2	0,687	5,488	2
2	5,04	7,840	1	2,948	10,528	3	2,290	2,804	2
3	7,780	6,171	2	1,143	1,549	1	4,827	13,658	3
4	0,641	4,543	1	2,761	8,988	3	5,733	12,021	2
5	3,365	4,893	1	1,008	11,001	3	2,297	3,779	2
6	2,608	7,314	1	2,658	17,097	3	5,950	18,032	3
7	4,898	7,701	1	1,505	12,526	3	5,202	11,612	3
8	1,888	7,099	1	2,763	19,550	3	3,120	13,003	3
9	3,022	7,250	1	1,003	19,322	3	5,602	18,904	3
10	3,520	7,730	1	0,543	19,007	3	2,360	12,748	3

Tabla 5.2: Prueba 2 del sistema desarrollado. Error en distancia y ángulo. Número de iteraciones necesarias.

Se muestra una gráfica con los puntos alcanzados por el robot durante la prueba en la figura 5.17.

## Prueba de giro

Al realizar las pruebas con el robot se observó que el nivel de carga de la batería era crítico de cara a obtener suficiente precisión en los ángulos de giro. Para comprobar las diferencias en los ángulos de giro se le ordenó al robot realizar un giro de 90 grados, primero con la batería recién cargada y después con ella a media carga. Los resultados se muestran en la tabla 5.3. En ella se aprecia que las diferencias son importantes, por lo que se ha de trabajar a la misma carga con la que se calibra el giro, para mayor facilidad, a plena carga.

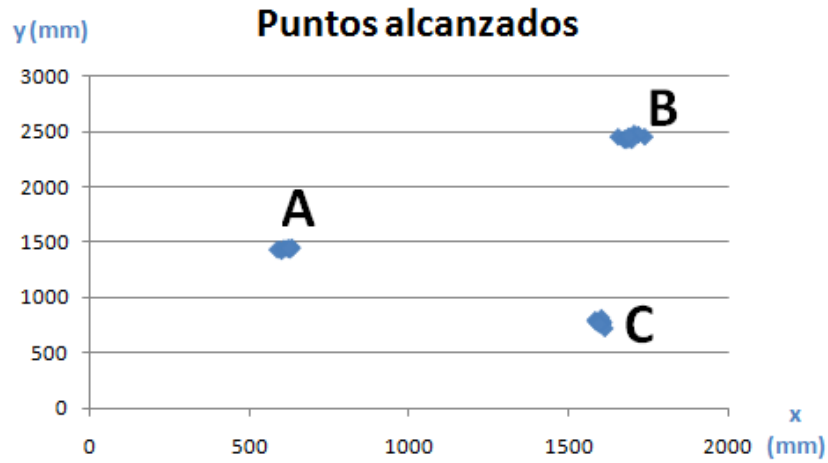


Figura 5.19: Puntos alcanzados por el robot durante la prueba 2.

Prueba	Ángulo girado (carga completa) (°)	Ángulo girado (media carga) (°)
1	92	85
2	93	84
3	92	85
4	94	85
5	93	84
6	95	85
7	94	86
8	93	84
9	94	85
10	92	85

Tabla 5.3: Ángulos de giro con baterías a plena y media carga. Ángulo ordenado 90 grados.



# 6

## Conclusiones y líneas futuras

### 6.1. Conclusiones

---

Se ha diseñado y construido una plataforma robótica como nodo móvil autónomo con capacidad de localización en interiores. El sistema de tracción elegido ha sido de tipo oruga, manteniendo el centro de giro del robot en el centro geométrico de la plataforma y aumentando la superficie de tracción entre la plataforma y el suelo. Las poleas y correas utilizadas para el sistema de tracción han sido de tipo dentado, lo que ha eliminado deslizamientos entre unas y otras. Los motores empleados, de corriente continua, combinados con los encoders, han facilitado la realización de movimientos precisos por parte del robot. Toda la plataforma ha sido construida con componentes comerciales, de tal forma que sea fácilmente reproducible.

Además de la plataforma, se ha fabricado una placa electrónica auxiliar encargada del acondicionamiento de las señales que maneja el robot, y se ha utilizado una placa de procesamiento basada en una FPGA y microprocesador embebido para el control de todo el sistema.

Como aplicación de demostración del robot construido, se ha realizado una aplicación de localización y navegación básica. Se ha diseñado un algoritmo iterativo de navegación para el nodo móvil. Este algoritmo está basado en el sistema de localización como combinación del método de ultrasonidos y encoders, y es capaz de determinar la orientación del robot. Para alcanzar un punto determinado, el algoritmo realiza un giro para orientarse al punto de destino y avanza la distancia que lo separa del mismo. Se han realizado pruebas de navegación entre distintos puntos de una habitación, ordenando al robot el seguimiento de determinados caminos que incluyen algunos puntos conocidos, y se han calculado los errores cometidos por el mismo. Se ha logrado alcanzar cualquier punto con un error menor de 5 cm, y un número medio de 2 iteraciones.

### 6.2. Líneas Futuras

---

El sistema de localización mediante ultrasonidos utilizado en el desarrollo del proyecto se basa en 3 balizas de ultrasonidos situadas en el techo. Actualmente, se están cursando proyectos que utilizan un mayor número de balizas emisoras para aumentar el área de cobertura y aumentar la precisión y robustez del sistema, a costa de contar con información redundante.

Otra línea de investigación futura que ya se ha empezado a probar es la realización de mapas de entorno, donde el robot navega localizando obstáculos y realizando labores de reconocimiento. De esta manera, el algoritmo de navegación se mejora para adaptarse a cada entorno.

Además también se prevé la construcción de varios robots que se comuniquen entre sí, colaborando en tareas como la realización de mapas o compartiendo información que recogen de sus sensores.

## Glosario de acrónimos

- **CMOS**: del inglés *Complementary Metal Oxide Semiconductor*, semiconductor complementario de óxido metálico, es una de las familias lógicas empleadas en la fabricación de circuitos integrados.
- **EEPROM**: del inglés *Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory*, memoria de sólo lectura, programable y borrable eléctricamente.
- **FPGA**: del inglés *Field Programmable Gate Array*, es un dispositivo semiconductor que contiene bloques de lógica cuya interconexión y funcionalidad puede ser configurada mediante un lenguaje de programación especializado.
- **I2C**: del inglés *Inter-Integrated Circuit* o *Circuitos Inter-Integrados*, es un bus de comunicaciones en serie.
- **JTAG**: del inglés *Joint Test Action Group*, es una norma utilizada para las pruebas de placas de circuitos impresos.
- **LCD**: del inglés *Liquid Crystal Display*, pantalla de cristal líquido
- **LED**: del inglés *Light Emitting Diode*, diodo emisor de luz. Es un dispositivo semiconductor que emite luz cuando se polariza de forma directa la unión PN del mismo y circula por él una corriente eléctrica.
- **PCB**: del inglés *Printed Circuit Board*, placa de circuito impreso.
- **PLB**: del inglés *Processor Local Bus*, bus local del procesador
- **RISC**: del inglés *Reduced Instruction Set Computer*, u ordenador con conjunto de instrucciones reducidas
- **RPM**: *Revoluciones Por Minuto*.
- **SRAM**: del inglés *Static Random Access Memory*, memoria estática de acceso aleatorio. Es un tipo de memoria basada en semiconductores capaz de mantener los datos, mientras esté alimentada, sin necesidad de circuito de refresco.
- **UART**: del inglés *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*, receptor/transmisor asíncrono universal, es un controlador de puertos y dispositivos serie.
- **WSN**: del inglés *Wireless Sensor Network*, es una red de sensores inalámbricos



## Bibliografía

- [1] K. Romer and F. Mattern. The design space of wireless sensor networks. *Wireless Communications, IEEE*, 11(6):54 – 61, December 2004.
- [2] V. Giordano, P. Ballal, F. Lewis, B. Turchiano, and Jing Bing Zhang. Supervisory control of mobile sensor networks: math formulation, simulation, and implementation. *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on*, 36(4):806 –819, August 2006.
- [3] Md.A. Rahman, Md.S. Miah, W. Gueaieb, and A.E. Saddik. Senora: A p2p service-oriented framework for collaborative multirobot sensor networks. *Sensors Journal, IEEE*, 7(5):658 –666, May 2007.
- [4] A. Ward, A. Jones, and A. Hopper. A new location technique for the active office. *IEEE Personal Communications*, 4(5):42–47, 1997.
- [5] M. R. McCarthy and H. L. Muller. RF free ultrasonic positioning. In *Proc. Seventh IEEE Int Wearable Computers Symp*, pages 79–85, 2003.
- [6] Arrick robotics, arobot platform, <http://www.arrickrobotics.com/>.
- [7] Videre design, era-mobi platform, <http://www.videredesign.com>.
- [8] The machine lab, mmp-8 platform, <http://www.themachinelab.com/mmp-8.html>.
- [9] Roboteq, wifibot platform, <http://www.roboteq.us>.
- [10] The robot shop, rp6 platform, <http://www.therobotshop.com/>.
- [11] Irobot & boeing, sugv 300 platform, <http://www.sugv.com/>.
- [12] Roboticsconnection, traxster ii platform, <http://www.roboticsconnection.com>.
- [13] K.S.J. Pister S. Bergbreiter. Cotsbots: An off-the-shelf platform for distributed robotics. In *IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2003.
- [14] G.S. Sukhatme G.T. Sibley, M.H. Rahimi. Robomote: A tiny mobile robot platform for large-scale ad-hoc sensor networks. In *IEEE/ICRA Intl. Conf. on Robotics and Automation*, 2002.
- [15] K. Dante, M. Rahimi, H. Shah, S. Babel, A. Dhariwal, and G.S. Sukhatme. Robomote: enabling mobility in sensor networks. In *Fourth Intl. Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, 2005.
- [16] L.E. Navarro-Serment, R. Grabowski, and C.J.J. Paredis. Millibots. *Robotics & Automation Magazine, IEEE.*, 2002.
- [17] M.B. McMickell, B. Goodwine, and L.A. Montestruque. Micabot: a robotic platform for large-scale distributed robotics. In *IEEE/ICRA Intl. Conf. on Robotics and Automation*, 2003.

- [18] R.B. Rusu, R. Robotin, G. Lazea, and C. Marcu. Towards open architectures for mobile robots: Zeero. In *IEEE Intl. Conf. On Automation, Quality and Testing, Robotics, Vol. 2*, pages 260–265, 2006.
- [19] K. Murase, K. Sekiyama, T. Naniwa, N. Kubota, and J. Sitte. Universal fpga microcontroller module for autonomous minirobots. In *3rd Intl. Symp. On Autonomous Minirobots for Research and Edutainment*, 2005.
- [20] A. Sanchez. Sistema de posicionamiento 3d para espacios interiores basado en ultrasonidos. Master’s thesis, Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid, 2010.
- [21] S. Elvira. Sistema de localización y orientación basado en recepción diferencial de ultrasonidos. Master’s thesis, Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid, Trabajo en desarrollo. Finalización prevista: julio 2011.
- [22] A. Sanchez, A. de Castro, G. Glez-de Rivera, and J. Garrido. Fpga-based embedded system for ultrasonic positioning. In *Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium on*, pages 3051 –3056, July 2010.



## Guía de usuario

Este apéndice se ha creado como una sencilla guía de usuario para la utilización del robot desarrollado. En él se encuentran esquemas básicos de conexión tanto a nivel electrónico, como mecánico.

### A.1. Conexiones mecánicas

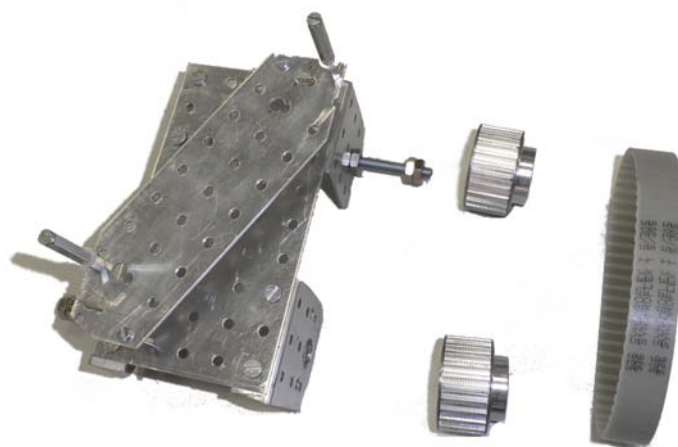


Figura A.1: Esquema de conexiones con la placa auxiliar desarrollada.

Las conexiones mecánicas de la estructura se aprecian de manera gráfica en la figura A.1, además, se incluye un diagrama del sistema de montaje en la figura A.2. Las piezas de sujeción de las poleas o ruedas se atornillan a la estructura principal, mediante dos juegos de tuerca y tornillo. Además las piezas se colocan de manera que los motores estén situados, uno en la parte delantera izquierda y otro en la trasera derecha, para lo que han de conectarse las piezas con el agujero grande en esas posiciones. En las otras dos posiciones libres se fijan las piezas con el agujero pequeño a las que se atornilla el eje de las poleas sueltas. Este eje irá fijado mediante una tuerca a su pieza correspondiente.

Una vez atornillados los ejes de las ruedas sueltas y los motores a la estructura, se insertan las poleas en los ejes. Para que las poleas correspondientes a las piezas con motor queden correctamente fijadas, se introduce una pequeña pieza de goma entre el eje del motor y la polea. Las piezas sin motor sujetarán sus poleas con un sistema de contratuerca, consistente en dos tuercas atornilladas juntas una contra la otra. Ha de dejarse suficiente espacio a la polea para que gire sin dificultad, por lo que las tuercas no han de estar apretadas contra la polea. Por último se encaja la correa entre las dos poleas de cada lado.

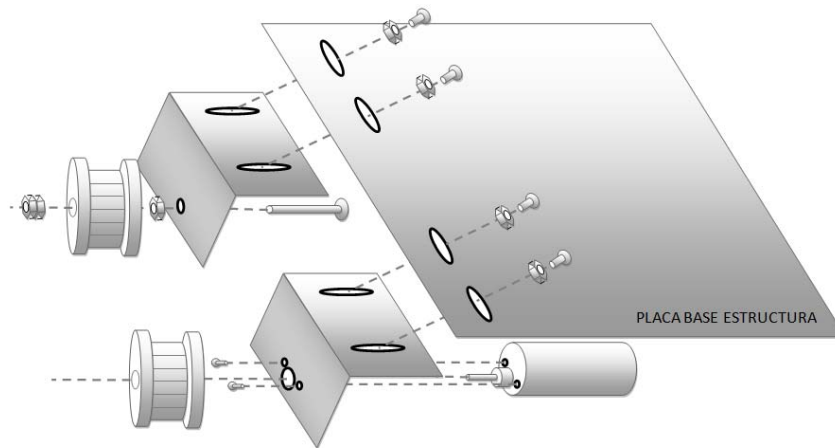


Figura A.2: Diagrama de montaje de la estructura robótica.

Finalmente, las placas electrónicas han de montarse con separadores metálicos de manera que formen un sistema de pisos y dejen en la parte inferior suficiente espacio para el sistema de alimentación. El resultado final ha de quedar como en la figura A.3. El aspecto final del robot montado se muestra en la figura A.4.

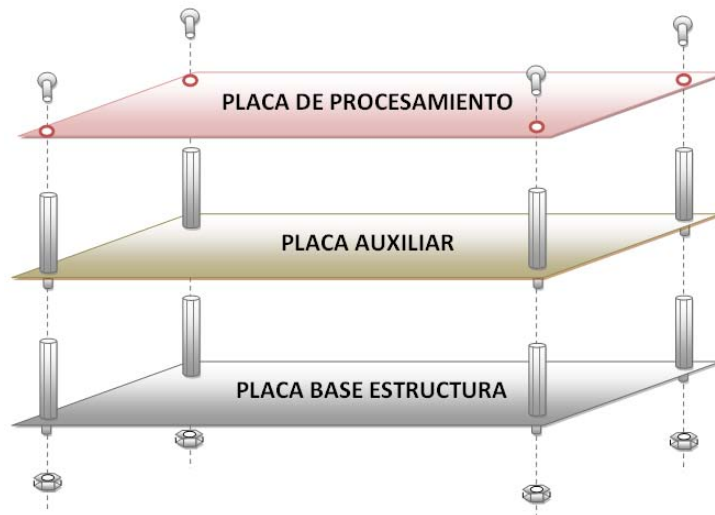


Figura A.3: Diagrama de montaje de las placas electrónicas.



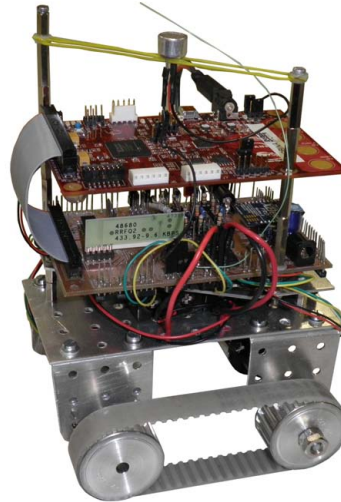


Figura A.4: Aspecto final del montaje del robot.

## A.2. Conexiones electrónicas

Una vez montada la estructura, con las piezas necesarias y las placas electrónicas, se deben realizar las conexiones necesarias para el correcto funcionamiento del robot. Por ello, en este apartado se incluye el listado de conexiones de la parte electrónica del proyecto.

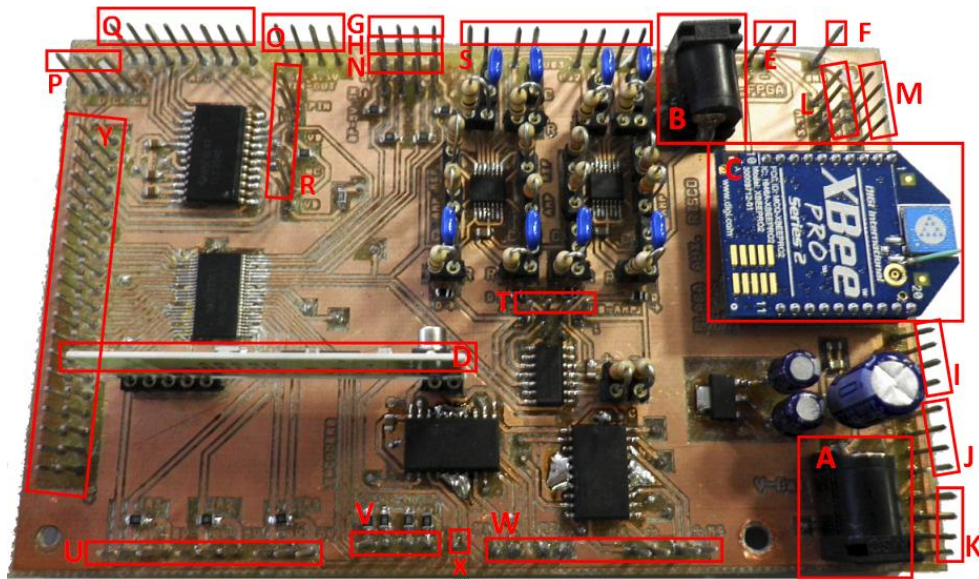


Figura A.5: Esquema de conexiones con la placa auxiliar desarrollada.

En la figura A.5 se muestra una fotografía de la placa auxiliar desarrollada. En ella se pueden apreciar, recuadradas en rojo, las partes donde se han de conectar los diferentes dispositivos. El listado de conexiones se puede ver en la tabla A.1.

La descripción de los pines que forman el conector de 40 pines que sirve para comunicar la placa auxiliar y la de procesamiento viene en la tabla A.2. Se puede ver un esquema con la numeración de cada pin en la figura A.6. Es importante destacar que todas las señales que llegan al conector de 40 pines están en el rango de 0-3,3 V, compatible con la FPGA de la placa de procesamiento.

PIN	DESCRIPCIÓN
A	Jack de alimentación para el robot. Alimenta tanto la placa de procesamiento, como los motores y la placa auxiliar. La tensión de alimentación del robot es de 7,2 V.
B	Jack de alimentación de la placa de procesamiento. A este jack le llegan 5 V que provienen del jack de alimentación A, y pasan previamente por un regulador. A él ha de conectarse un cable doble jack que una la placa auxiliar con la placa de procesamiento.
C	Módulo emisor/receptor de Zigbee. Se encarga de la comunicación del robot con otro robot o un ordenador.
D	Conector del receptor de radio. La antena se suelda en el pin X.
E	Pines de alimentación a 0 V y 5 V.
F	Pin de conexión a tierra o GND.
G	Pines de conexión a tierra o GND.
H	Pines de alimentación a 5 V.
I	Pines de conexión a tierra o GND.
J	Pines de alimentación con la misma tensión que la proporcionada por A.
K	Pines de alimentación a 5 V.
L	Pines de alimentación a 3,3 V.
M	Pines de alimentación a 2,5 V.
N	Pines de entrada de propósito general a 5 V.
O	Pines de entrada/salida de propósito general a 3,3 V.
P	Pines de conexión de dispositivo SPI externo para el conversor analógico digital. De izquierda a derecha: entrada y salida de datos en serie, reloj y señal de selección de chip
Q	Canales del conversor analógico digital: de izquierda a derecha, canales del 8 al 1.
R	Pines de selección de entrada al canal 0 del conversor analógico digital. Permiten conectar la batería de alimentación al canal 0 del conversor analógico digital para conocer su nivel, o dejarlo libre para realizar medidas sobre una señal analógica externa. De arriba a abajo, los tres primeros pines conectan el canal 0 del conversor o al pin Q1 (conectando los pines 1 y 2 con un jumper) o a la batería (conectando los pines 2 y 3). Los pines 4 a 6 conectan (uniendo pines 4 y 5) o dejan sin conexión (uniendo 5 y 6) el divisor resistivo con la batería.
S	Pines de entrada para los sensores receptores de ultrasonidos, cada receptor usa un par de pines. No tienen polaridad. De izquierda a derecha, sensor 4 a sensor 1.
T	Pines de señales de ultrasonidos amplificadas. De izquierda a derecha, señal de ultrasonidos amplificada 4 a 1.
U	Conectores de entrada para sensores digitales de detección de obstáculos por infrarrojos, con resistencias de pull-up de 1,8 k $\Omega$ incluidas. Para cada uno de los tres, se tienen tres pines: 0 V, datos y 5 V.
V	Pines de entrada de datos de encoders. En los dos primeros pines se encuentran los dos canales del encoder derecho, y en los dos siguientes los canales del izquierdo.
W	Conectores de alimentación de salida de los motores. La tensión de alimentación es la máxima proporcionada por la batería. La placa auxiliar admite hasta 4 motores. De izquierda a derecha, y cada grupo de dos pines corresponden a cada uno de los motores 1 a 4.
X	Pin de conexión de entrada de la antena del receptor de radio.
Y	Conector de 40 pines que conecta la placa de procesamiento y la auxiliar, para intercambiar datos entre las mismas. La explicación de cada uno de los pines del conector se detalla en la tabla A.2. Además se muestra un esquema de numeración de pines en la figura A.6.

Tabla A.1: Descripción de los pines de la placa auxiliar desarrollada.

PIN	DESCRIPCIÓN (entradas y salidas referidas a la placa de procesamiento)
Y1	Sin conexión.
Y2	Sin conexión.
Y3	3,3 V de salida para alimentar la electrónica de 3,3 V de la placa auxiliar.
Y4	Chip select del conversor analógico digital.
Y5	Salida de datos del emisor/receptor Zigbee.
Y6	Entrada de datos del emisor/receptor Zigbee.
Y7	Selector de canal del conversor analógico digital.
Y8	Reloj del conversor analógico digital.
Y9	Salida de datos del conversor analógico digital.
Y10	Entrada de datos del conversor analógico digital.
Y11	Pin de entrada 1 de propósito general.
Y12	Pin de entrada 2 de propósito general.
Y13	Pin de entrada 3 de propósito general.
Y14	Pin de entrada 4 de propósito general.
Y15	Pin de entrada/salida 1 de propósito general a 3,3 V.
Y16	Pin de entrada/salida 2 de propósito general a 3,3 V.
Y17	Pin de entrada/salida 3 de propósito general a 3,3 V.
Y18	Pin de entrada/salida 4 de propósito general a 3,3 V.
Y19	Entrada de la señal digitalizada del receptor de ultrasonidos 4.
Y20	Entrada de la señal digitalizada del receptor de ultrasonidos 1.
Y21	Entrada de la señal digitalizada del receptor de ultrasonidos 2.
Y22	Entrada de la señal digitalizada del receptor de ultrasonidos 3.
Y23	Entrada del canal 1 del encoder 2.
Y24	Entrada del canal 2 del encoder 2.
Y25	Entrada del canal 1 del encoder 1.
Y26	Entrada del canal 1 del encoder 1.
Y27	Entrada de datos del sensor de infrarrojos digital 1.
Y28	Entrada de datos del sensor de infrarrojos digital 2.
Y29	Entrada de datos del sensor de infrarrojos digital 3.
Y30	Entrada señal de datos del receptor de radio.
Y31	Salida pin 1 motor 2.
Y32	Salida pin 2 motor 2.
Y33	Salida pin 1 motor 3.
Y34	Salida pin 2 motor 3.
Y35	Salida pin 1 motor 1.
Y36	Salida pin 2 motor 1.
Y37	Salida pin 1 motor 4.
Y38	Salida pin 2 motor 4.
Y39	Sin conexión.
Y40	Sin conexión.

Tabla A.2: Descripción del conector de 40 pines de la placa auxiliar desarrollada.

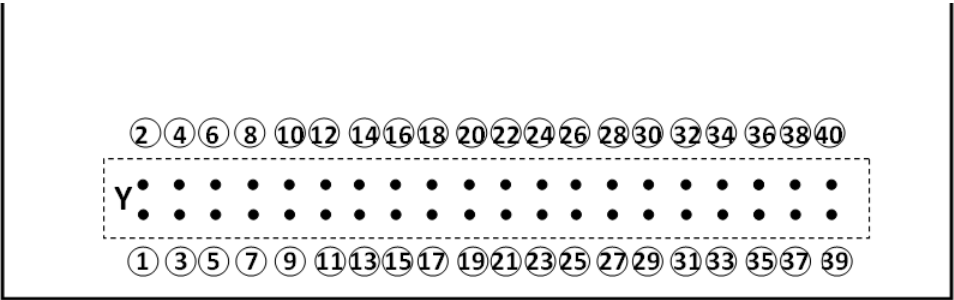


Figura A.6: Esquema de numeración del conector de 40 pines.



## Pliego de condiciones

Este documento contiene las condiciones legales que guiarán la realización, en este proyecto, de una plataforma robótica como nodo móvil de redes de sensores. En lo que sigue, se supondrá que el proyecto ha sido encargado por una empresa cliente a una empresa consultora con la finalidad de realizar dicho sistema. Dicha empresa ha debido desarrollar una línea de investigación con objeto de elaborar el proyecto. Esta línea de investigación, junto con el posterior desarrollo de los programas está amparada por las condiciones particulares del siguiente pliego.

Supuesto que la utilización industrial de los métodos recogidos en el presente proyecto ha sido decidida por parte de la empresa cliente o de otras, la obra a realizar se regulará por las siguientes condiciones.

### **B.1. Condiciones generales**

---

1. La modalidad de contratación será el concurso. La adjudicación se hará, por tanto, a la proposición más favorable sin atender exclusivamente al valor económico, dependiendo de las mayores garantías ofrecidas. La empresa que somete el proyecto a concurso se reserva el derecho a declararlo desierto.
2. El montaje y mecanización completa de los equipos que intervengan será realizado totalmente por la empresa licitadora.
3. En la oferta, se hará constar el precio total por el que se compromete a realizar la obra y el tanto por ciento de baja que supone este precio en relación con un importe límite si este se hubiera fijado.
4. La obra se realizará bajo la dirección técnica de un Ingeniero Superior de Telecomunicación, auxiliado por el número de Ingenieros Técnicos y Programadores que se estime preciso para el desarrollo de la misma.
5. Aparte del Ingeniero Director, el contratista tendrá derecho a contratar al resto del personal, pudiendo ceder esta prerrogativa a favor del Ingeniero Director, quien no estará obligado a aceptarla.

6. El contratista tiene derecho a sacar copias a su costa de los planos, pliego de condiciones y presupuestos. El Ingeniero autor del proyecto autorizará con su firma las copias solicitadas por el contratista después de confrontarlas.
7. Se abonará al contratista la obra que realmente ejecute con sujeción al proyecto que sirvió de base para la contratación, a las modificaciones autorizadas por la superioridad o a las órdenes que con arreglo a sus facultades le hayan comunicado por escrito al Ingeniero Director de obras siempre que dicha obra se haya ajustado a los preceptos de los pliegos de condiciones, con arreglo a los cuales, se harán las modificaciones y la valoración de las diversas unidades sin que el importe total pueda exceder de los presupuestos aprobados. Por consiguiente, el número de unidades que se consignan en el proyecto o en el presupuesto, no podrá servirle de fundamento para entablar reclamaciones de ninguna clase, salvo en los casos de rescisión.
8. Tanto en las certificaciones de obras como en la liquidación final, se abonarán los trabajos realizados por el contratista a los precios de ejecución material que figuran en el presupuesto para cada unidad de la obra.
9. Si excepcionalmente se hubiera ejecutado algún trabajo que no se ajustase a las condiciones de la contrata pero que sin embargo es admisible a juicio del Ingeniero Director de obras, se dará conocimiento a la Dirección, proponiendo a la vez la rebaja de precios que el Ingeniero estime justa y si la Dirección resolviera aceptar la obra, quedará el contratista obligado a conformarse con la rebaja acordada.
10. Cuando se juzgue necesario emplear materiales o ejecutar obras que no figuren en el presupuesto de la contrata, se evaluará su importe a los precios asignados a otras obras o materiales análogos si los hubiere y cuando no, se discutirán entre el Ingeniero Director y el contratista, sometiendo a la aprobación de la Dirección. Los nuevos precios convenidos por uno u otro procedimiento, se sujetarán siempre al establecido en el punto anterior.
11. Cuando el contratista, con autorización del Ingeniero Director de obras, emplee materiales de calidad más elevada o de mayores dimensiones de lo estipulado en el proyecto, o sustituya una clase de fabricación por otra que tenga asignado mayor precio o ejecute con mayores dimensiones cualquier otra parte de las obras, o en general, introduzca en ellas cualquier modificación que sea beneficiosa a juicio del Ingeniero Director de obras, no tendrá derecho sin embargo, sino a lo que le correspondería si hubiera realizado la obra con estricta sujeción a lo proyectado y contratado.
12. Las cantidades calculadas para obras accesorias, aunque figuren por partida alzada en el presupuesto final (general), no serán abonadas sino a los precios de la contrata, según las condiciones de la misma y los proyectos particulares que para ellas se formen, o en su defecto, por lo que resulte de su medición final.
13. El contratista queda obligado a abonar al Ingeniero autor del proyecto y director de obras así como a los Ingenieros Técnicos, el importe de sus respectivos honorarios facultativos por formación del proyecto, dirección técnica y administración en su caso, con arreglo a las tarifas y honorarios vigentes.
14. Concluida la ejecución de la obra, será reconocida por el Ingeniero Director que a tal efecto designe la empresa.
15. La garantía definitiva será del 4 % del presupuesto y la provisional del 2 %.
16. La forma de pago será por certificaciones mensuales de la obra ejecutada, de acuerdo con los precios del presupuesto, deducida la baja si la hubiera.

17. La fecha de comienzo de las obras será a partir de los 15 días naturales del replanteo oficial de las mismas y la definitiva, al año de haber ejecutado la provisional, procediéndose si no existe reclamación alguna, a la reclamación de la fianza.
18. Si el contratista al efectuar el replanteo, observase algún error en el proyecto, deberá comunicarlo en el plazo de quince días al Ingeniero Director de obras, pues transcurrido ese plazo será responsable de la exactitud del proyecto.
19. El contratista está obligado a designar una persona responsable que se entenderá con el Ingeniero Director de obras, o con el delegado que éste designe, para todo relacionado con ella. Al ser el Ingeniero Director de obras el que interpreta el proyecto, el contratista deberá consultarle cualquier duda que surja en su realización.
20. Durante la realización de la obra, se girarán visitas de inspección por personal facultativo de la empresa cliente, para hacer las comprobaciones que se crean oportunas. Es obligación del contratista, la conservación de la obra ya ejecutada hasta la recepción de la misma, por lo que el deterioro parcial o total de ella, aunque sea por agentes atmosféricos u otras causas, deberá ser reparado o reconstruido por su cuenta.
21. El contratista, deberá realizar la obra en el plazo mencionado a partir de la fecha del contrato, incurriendo en multa, por retraso de la ejecución siempre que éste no sea debido a causas de fuerza mayor. A la terminación de la obra, se hará una recepción provisional previo reconocimiento y examen por la dirección técnica, el depositario de efectos, el interventor y el jefe de servicio o un representante, estampando su conformidad el contratista.
22. Hecha la recepción provisional, se certificará al contratista el resto de la obra, reservándose la administración el importe de los gastos de conservación de la misma hasta su recepción definitiva y la fianza durante el tiempo señalado como plazo de garantía. La recepción definitiva se hará en las mismas condiciones que la provisional, extendiéndose el acta correspondiente. El Director Técnico propondrá a la Junta Económica la devolución de la fianza al contratista de acuerdo con las condiciones económicas legales establecidas.
23. Las tarifas para la determinación de honorarios, reguladas por orden de la Presidencia del Gobierno el 19 de Octubre de 1961, se aplicarán sobre el denominado en la actualidad §Presupuesto de Ejecución de Contrata§ y anteriormente llamado §Presupuesto de Ejecución Material§ que hoy designa otro concepto.

## **B.2. Condiciones particulares**

---

La empresa consultora, que ha desarrollado el presente proyecto, lo entregará a la empresa cliente bajo las condiciones generales ya formuladas, debiendo añadirse las siguientes condiciones particulares.

1. La propiedad intelectual de los procesos descritos y analizados en el presente trabajo, pertenece por entero a la empresa consultora representada por el Ingeniero Director del Proyecto.
2. La empresa consultora se reserva el derecho a la utilización total o parcial de los resultados de la investigación realizada para desarrollar el siguiente proyecto, bien para su publicación o bien para su uso en trabajos o proyectos posteriores, para la misma empresa cliente o para otra.

3. Cualquier tipo de reproducción aparte de las reseñadas en las condiciones generales, bien sea para uso particular de la empresa cliente, o para cualquier otra aplicación, contará con autorización expresa y por escrito del Ingeniero Director del Proyecto, que actuará en representación de la empresa consultora.
4. En la autorización se ha de hacer constar la aplicación a que se destinan sus reproducciones así como su cantidad.
5. En todas las reproducciones se indicará su procedencia, explicitando el nombre del proyecto, nombre del Ingeniero Director y de la empresa consultora.
6. Si el proyecto pasa la etapa de desarrollo, cualquier modificación que se realice sobre él, deberá ser notificada al Ingeniero Director del Proyecto y a criterio de éste, la empresa consultora decidirá aceptar o no la modificación propuesta.
7. Si la modificación se acepta, la empresa consultora se hará responsable al mismo nivel que el proyecto inicial del que resulta el añadirla.
8. Si la modificación no es aceptada, por el contrario, la empresa consultora declinará toda responsabilidad que se derive de la aplicación o influencia de la misma.
9. Si la empresa cliente decide desarrollar industrialmente uno o varios productos en los que resulte parcial o totalmente aplicable el estudio de este proyecto, deberá comunicarlo a la empresa consultora.
10. La empresa consultora no se responsabiliza de los efectos laterales que se puedan producir en el momento en que se utilice la herramienta objeto del presente proyecto para la realización de otras aplicaciones.
11. La empresa consultora tendrá prioridad respecto a otras en la elaboración de los proyectos auxiliares que fuese necesario desarrollar para dicha aplicación industrial, siempre que no haga explícita renuncia a este hecho. En este caso, deberá autorizar expresamente los proyectos presentados por otros.
12. El Ingeniero Director del presente proyecto, será el responsable de la dirección de la aplicación industrial siempre que la empresa consultora lo estime oportuno. En caso contrario, la persona designada deberá contar con la autorización del mismo, quien delegará en él las responsabilidades que ostente.





## Presupuesto

<b>Ejecución material</b>	
Compra de ordenador personal	1.000 €
Software utilizado (Xilinx ISE, Modelsim, Orcad Pspice)	1.200 €
Material de oficina	100 €
Componentes robot (estructura, motores, <i>encoders</i> , poleas y correas)	180 €
Placa auxiliar	600 €
Placa de procesamiento	50 €
<hr/>	
Total Ejecución material	3130 €
 <b>Gastos generales</b>	
16 % sobre Ejecución Material	500 €
 <b>Beneficio industrial</b>	
6 % sobre Ejecución Material	188 €
 <b>Honorarios proyecto</b>	
1000 horas a 15 €/h	15.000 €
 <b>Material fungible</b>	
Gastos impresión y encuadernación	170 €
 <b>Subtotal del presupuesto</b>	18.988 €
 <b>I.V.A. aplicable</b>	
18 % sobre Subtotal Presupuesto	3.418 €
<hr/>	
<b>Total presupuesto</b>	22.406 €

Madrid, Junio 2011

El Ingeniero Jefe de Proyecto

Fdo.: Isabel Cortés de la Vega. Ingeniero superior de Telecomunicación





## Publicación

Fruto del trabajo realizado durante este proyecto ha sido aceptada para su presentación la publicación titulada «*Robotic Platform for Localization Based on Ultrasound-Encoder Sensor Fusion*», en el congreso «*26th Conference on Design of Circuits and Integrated Systems (DCIS 2011)*».

# Robotic platform for localization based on ultrasound-encoder sensor fusion

Isabel Cortes, Alberto Sanchez, Santiago Elvira, Guillermo Glez-de-Rivera, Angel de Castro, Javier Garrido

HCTLab, Univ. Autonoma de Madrid.  
Francisco Tomas y Valiente 11, Madrid, Spain  
alberto.sanchezgonzalez@uam.es

**Abstract**—This paper presents a robotic platform as a mobile node suitable for indoor purposes focused on positioning. Ultrasonic sensors, as well as encoders, are used to calculate the node position. Using ultrasounds, position can be calculated with the time-of-flight of ultrasound signals and trilateration. Using encoders, the node position is calculated from a known starting point, adding the distance advanced by the motors. The precision achieved by the fusion of these two methods is greater than the one achieved by each method separately. The developed platform is based on the fusion of both methods to locate in space.

## I. INTRODUCTION

Wireless Sensor Networks (WSN) have gained increasing importance in recent years due to their numerous application areas [1], [2], [3]. Topics like deployment or collaborative tasks have been investigated. Adding mobile nodes in WSN increases the capabilities of the network, such as dynamically changing its topology, repairing nodes, and mapping new areas. This paper focuses on the design of a robotic platform to implement an autonomous mobile node inside a wireless sensor network. However, the proposed platform can be used as an autonomous wheel-based robot.

When a robot or WSN node is mobile, positioning is crucial in order to navigate through an area. There are several methods for the positioning, such as cameras or Global Positioning System (GPS). Nonetheless, cameras require high processing power and involve high energy consumption and high cost, and the use of GPS is not applicable at indoor environments for its lack of indoor coverage, and it is not able to achieve enough accuracy for the small size of the robot.

Ultrasonic positioning has been used for indoor positioning in several configurations [4], [5] because it provides high accuracy at low cost. With ultrasonics the node position can be calculated by measuring the elapsed time since the transmitter emits the signal until the receiver gets it. With this time and the propagation speed of ultrasonics, the distance between transmitter and receiver can be calculated.

The inherent problems in this type of systems are acoustic shadows arising from nearby objects that stand in the path between sender and receiver, and problems related to the rebound of ultrasounds in such objects or walls. These problems cause erroneous estimations of the mobile node position.

Another alternative is the use of motor encoders to determine the distance traveled by the robot when it moves. With this system, the robot knows where it is situated relative to a starting point. However, encoder also present problems like error accumulation, since this is an inertial system in which the final position is obtained through the sum of all intermediate moves made since the starting point. As every intermediate move can lead to a small error, the final error accumulates these errors and can become too high.

With the problems seen in these solutions we can state that none of them is by itself a good alternative for dealing with location. That leads to the concept of sensor fusion, which combines several methods to increase overall accuracy. This method achieves higher benefits at the expense of redundant information, which forces the decision-making when different methods yield different results. For our system we have used ultrasonic sensors and encoders.

There are many commercial robotic platforms available, with different sizes, costs and applications. Some examples are:

AROBOT-P1[6] (Arrick Robotics) 25.4 cm (L) x 25.4 cm (W), 12.7 cm (H), weight 0.9 kg. Its most remarkable features are: rugged aluminum frame, 3-wheel: front wheel drive and rear wheel steer, front wheel dc gear drive motor with optical wheel encoder for distance measurement. It runs on 8 AA-cell batteries for 5 hours or more.

ERA-MOBI[7] (Videre Design) 40 cm (L) x 37 cm (W) x 18 cm (H), weight: 4.5 kg. It has differential drive type, single rear caster and dc reversible 72 W motors with gearhead. It also has encoders with resolution of 500 cycles per motor revolution and runs on 3 lead-acid batteries, of 12 V.

MMP-8[8] (The Machine Lab) 38.7 cm (L) x 31.75 cm (W) x 10.8 cm (H), weight: 3.4 kg. It has two halves aluminum chassis with a passive suspension joint that enables the two halves to rotate independently in rough terrain. With 6 independent motors, it runs on NiCad 1400 mAh 12 V rechargeable batteries for over 45 minutes with single battery pack.

RP6[9] (The Robot Shop) with a 18 cm (L) x 13.5 cm (W) x 5.8 cm (H) plastic chassis, has two caterpillar tracks

connected to two 7.2 V dc motors, encoders with a resolution of 625 pulses per rotation resolution, audio sensor, available port for connecting an LCD, LED status indicators, control buttons, infrared sensors and light sensors.

SUGV 300[10] (iRobot and Boeing) 70.8 cm (L) x 34.8 cm (W) x 22.8 cm (H), weight: 13.15 kg. It has an aluminum chassis, with two drive belts and two assistant belts, radio transceiver module, camera, remote control and wireless communication. It runs on 28.8 V rechargeable lithium batteries, with an autonomy of 6 hours.

TRAXSTER II[11] (RoboticsConnection) Length: 22.8 cm (L) x 20.3 cm (W) x 7.6 cm (H), weight: 0.9 kg. It has an aluminum chassis with two straps forming a caterpillar track system. It also has two 7.2V dc motors with gearbox 1:52, that spin at 160 rpm with no load, with quadrature encoders. It runs with two 9.6 V batteries.

As well as commercial platforms, several platforms have been developed in research projects, such as:

COTBOTS[12] (Berkeley University) consists of a plastic chassis with four-wheel drive, and has motor controllers with dual channel, a wireless radio connection, a serial/parallel interface, a 10-bit and 8 channels analog/digital converter, FM Radio, configurable LEDs, and a JTAG port.

ROBOMOTE[13], [14] (Southern California University) is a miniature platform with two wheels connected to two independent micro servos controlled by PWM. It has a radio interface with serial communication protocol, odometry sensors, compass, and infrared sensors. The power feed is provided by three 1.5 V solar rechargeable batteries.

MILLIBOT[15] (Carnegie Mellon Institute) is a modular miniature structure with caterpillar tracks. It has wireless interface, sonar obstacle detection with piezoelectric transducers, infrared sensors to detect heat sources, digital camera and ultrasonic transceiver.

MICABOT[16] (Notre Dame University) is a miniature structure with two wheel connected to two independent dc motors controlled by PWM, and an omnidirectional spherical rear wheel. It has wireless radio interface and Hall effect sensors. Power feed provided by rechargeable Ni-MH AA batteries.

ZeeRO[17] (Technical University of Cluj-Napoca) is an aluminum platform with two wheels connected to two independent servos controlled by PWM. It has bluetooth interface, infrared sensors, ultrasonic sensors, video camera and pyroelectric sensor.

KHEPERA[18] (Federal Polytechnic school of Lausanne) is a platform with two wheels connected to two independent servo motors. It has encoders with a precision of 12 pulses per millimeter, infrared sensors, bluetooth interface and video camera. Power is supplied by rechargeable Ni-Cd batteries with an autonomy of 30 minutes.

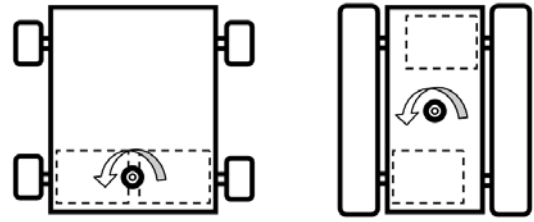


Fig. 1. Motor placement in two different structures. Rotation axis.

None of the presented platforms fulfills our requirements: motors with encoders, low cost and small size. Therefore, in this paper we present a low-cost small robotic platform with dc motors, precision encoders and an ultrasonic positioning system. The robot has caterpillar tracks, for better adhesion to surfaces and to easily maintain the rotation axis in the center of the structure. The robotic platform can be used with indoor WSN as well as in any robotic application, since its design is based on modular peripherals.

## II. ARCHITECTURE/DESIGN

This paper presents a low-cost robot platform. The designed robot allows indoor movements, wireless communication, and simple navigation among different points inside a room, using an ultrasonic positioning system using transmitting beacons. Size and weight have been also taken into account. The robot has three layers clearly differentiated: traction layer, signal conditioning and electronic layer, and processing layer.

The traction layer consists of two dc motors with encoders. Dc motors are usually cheaper than stepper motors, and its management is easier. In order to control the movement of the robot accurately, an optical encoder has been attached to each motor. Using the encoders, the motor controller knows continuously the traveled distance and is able to stop the motors at the precise time.

The traction of the robot is based on caterpillar tracks. Using this system, there are two main advantages: the traction is improved because there is more traction surface, and the rotation axis coincides with the geometric center of the robot, which simplifies the navigation algorithm. Fig.1 shows the rotation axis in two different systems, the first one with front wheel drive, and the second one with caterpillar tracks and diagonally placed motors, to reduce the size of the robot. As figure shows, the caterpillar tracks fix the rotation axis in the geometric center of the robot, so navigation is easier.

The conditioning layer implements all the additional electronics used for communication, positioning and motor management. This layer includes a wireless radio, an ultrasonic receiver with an amplification and conditioning stage, drivers to control the motors, an 8-channel ADC, and all the conditioning electronics necessary.

Finally, the processing layer is based on an FPGA (Field

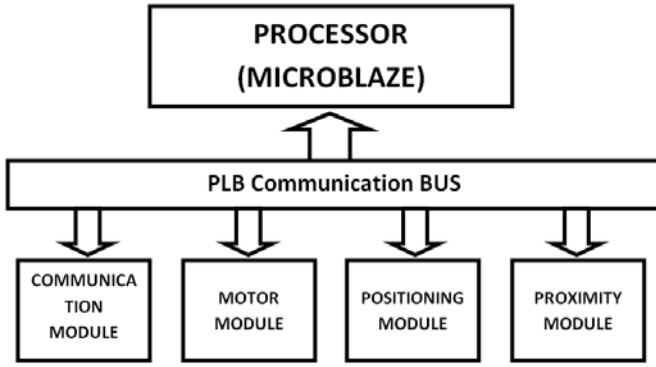


Fig. 2. Block diagram of the MicroBlaze processor.

Programmable Gate Array). In order to design a versatile platform, different tasks must be done in parallel so, for example, extensive communication should not interfere in ultrasonic positioning or motor management. Future expansions must also be supported. For this reason, a system with a processor and several peripherals has been designed. The processor is the main unit of the system, which accomplishes algorithmic tasks such as communication, navigation, and decision-making, while several peripherals in parallel manage the motors, sample the ultrasonic positioning signals and read several sensors.

A block diagram of the system is shown in Fig.2. The whole system is based on a Xilinx Microblaze 32 bits soft-processor and several ad-hoc peripherals to accomplish different tasks in parallel. All modules are connected by a Processor Local Bus (PLB) shared communication bus. The embedded system mainly has 4 peripherals connected to the processor: wireless communication, motor management, positioning system, and proximity sensors management. If a new specific task must be accomplished, a new peripheral can be designed and easily connected to the communication bus, providing expansion capabilities.

Communication peripheral enables the information transmission between the mobile node and another device, which can be a computer or another robot (for example, in a collaborative task). The communication protocol used by the platform is Zigbee, which provides high-range communication, different topologies, and low-power communication. UART protocol is used to control the Zigbee module attached to the robot. Using Zigbee, the communication can be accomplished not only with point to point topology, but also with more complex topologies like mesh.

Motor peripheral manages the dc motors as well as the encoders of the robotic platform. This peripheral provides a simple interface to set different movement configuration, taking into account if the movement of each motor must be clockwise or not and the speed of the movement. The processor can also specify the number of revolutions that the motor must carry out, which can be done with the encoders

attached to each motor. These encoders can measure motor revolutions, and when they reach the number specified by the processor, the peripheral stops the motor. The peripheral is also capable of throwing an interruption so the microprocessor is notified. The interruption-based communication allows the microprocessor not to be continuously reading the peripheral data.

The positioning peripheral is based on the system presented in [19], [20]. The positioning system consists of several ultrasound sensors placed at the ceiling, which periodically transmit an ultrasound signal, while the mobile node or robot has an ultrasonic receiver. The robot measures the time-of-flight of the ultrasonic signal and taking into account the speed of sound, the distance between the transmitter and the robot can be estimated. Taking distances to several transmitters, the robot knows its position applying trilateration. In order to get the time-of-flight of the signal, the emission time must be known, so a radiofrequency signal is used to synchronize the devices. Radiofrequency can be used for this purpose because its speed is about  $10^6$  times faster, so the time-of-flight of synchronization signal can be negligible. This peripheral samples the radiofrequency and ultrasonic signals and measures the time between both arrivals expressed in clock cycles. The translation from clock cycles to millimeters is accomplished by software in the processor.

The proximity peripheral manages the infrared sensors used to detect obstacle while the robot is moving. This peripheral is continuously reading data from the infrared proximity detector, and sends an interruption when an obstacle has been detected.

### III. IMPLEMENTATION

#### A. Mechanics

The platform is built with pre-drilled aluminum plates. Caterpillar tracks have been designed with pulleys and belts. The straps are made of rubber, to avoid slipping to the floor. The platform is designed to place the dc motors diagonally, that is, one in the left front of the structure and another on the right rear, obtaining this way a narrow structure. In the free parts, pulleys are connected to a shaft with free movement, both in the front right and the left rear. Finally, two belts connect the pulley attached to the motor to the pulley attached to the loose shaft at both sides of the structure. This can be seen in Fig.1, in which motors are represented by dashed rectangles.

Selected motors are GHM-04 from Lynxmotion, supplied by 7.2 V dc, with a 50:1 gearbox. They spin at 175 rpm with no load. To manage the motors, a L293DD push-pull four channel driver with diode protection is used, from ST Microelectronics. Specific encoders have been chosen to be attached on the selected motors: the quadrature optical encoder E4P-100-079-DHTB from USDigital, which generates 100 cycles per revolution and 400 quadrature counts per revolution. These encoders are fixed at the rear part of the engine to an

auxiliary shaft available for this purpose. This way, the encoder pulses are counted before the gearbox, which gives them a higher precision.

Traveled distance per motor revolution can be calculated taking into account the caterpillar track radius, 2 cm in our platform:

$$D = 2 \times \pi \times r = 2 \times \pi \times 2 \text{ cm} = 12.56 \text{ cm per revolution}$$

Where D is the distance per revolution, and r is the caterpillar track radius.

The number of encoder pulses per motor revolution can be calculated as following:

$$Pr = p_{gb} \times g_b = 100 \times 50 = 5000 \text{ pulses per revolution}$$

Where Pr are the pulses per motor revolution, p<sub>gb</sub> pulses before gearbox, and g<sub>b</sub> gearbox ratio, in this case 50:1.

The number of encoder pulses per distance can be calculated with the distance per motor revolution, and the pulses per revolution:

$$P = \frac{Pr}{D} = \frac{5000}{12.56} = 39.788 \text{ pulses per cm}$$

Where P is the number of encoder pulses per cm, and Pr is the number of encoder pulses per revolution.

This means that the encoder outputs 39.788 pulses each centimeter, so in 1 pulse it runs 0.025 cm, which is the whole system resolution.

The theoretical formula is used to calculate the number of pulses required to cover a given distance. In practice, this formula is not accurate enough, due to the complexity of accurately measuring the effective radius of the wheel, because the point of contact with the floor changes depending on conditions. Besides, the belt tension causes retention in the motors. An empirical formula was calculated to take into account such things.

In order to calculate the empirical formula, the robot was ordered to advance a series of known distances, recording the real distance it moved. It was noted that for long distances, the robot had a constant error, while for short distances, in which the robot had not reached a constant speed the error depended on the travelled distance. Therefore, the empirical formula was divided into two parts, one for short distances, which applies the formula of a line in which the error in the distance is considered a constant, and another for short distances in which the error is considered a straight line. The distance from which a linear behavior is achieved, is 1.5 cm.

The reason for which the error is constant at long distances is that the motors have achieved its speed, meanwhile if the distance is short, the motors are still accelerating.

Therefore, the empirical formula has the same structure in both cases:

$$p = C \times d - e$$

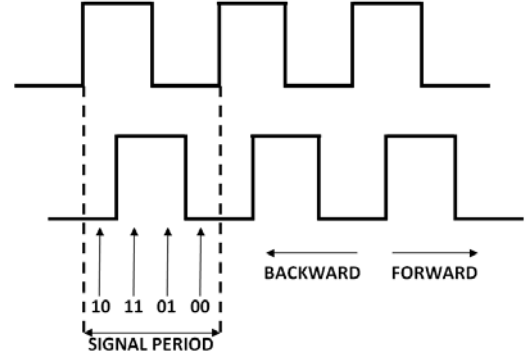


Fig. 3. Quadrature encoder operation.

Where p is the number of encoder pulses, d the distance for the motors to move, C a constant and e the distance error.

Finally, for each case:

$$p = 39.708 \times d - 1500, \text{ when } d \geq 1.5 \text{ cm}$$

$$p = 39.708 \times d - (0.2328 \times 39.708 \times d + 223.83) = 30.464 \times d + 223.83, \text{ when } d \leq 1.5 \text{ cm}$$

### B. Microblaze FPGA Design

The motor peripheral is responsible for all matters relating to the drive system of the mobile node, such as the control signals that move each motor, and the encoder signals that indicate how many pulses has moved the motor.

Motors are controlled by DPWM. Digital pulse width modulation or DPWM consists of modifying the duty cycle of a periodic signal to control the amount of energy sent to the motors at a fixed frequency. This controls the motor speed, as it is proportional to the speed. Duty cycle (Dc) is the relation between the width of the positive part of the signal (Ton) and its period (T).  $Dc = \frac{T_{on}}{T}$

The operation of an optical quadrature encoder is explained graphically in Fig.3, in which both channel signals, A and B, of the encoder can be appreciated. The upper signal is channel A and the lower signal is channel B. As can be seen, both channels return the same square periodic signal, one 90° out of phase from the other. Motor rotational direction is detected by the stream returned by the two channel encoder. Thus, if the motor turns clockwise, the periodic sequence obtained will be "10 11 01 00" whereas if it turns anticlockwise, will be "00 01 11 10". In the figure, it can be seen a complete encoder cycle, bounded by two dashed lines. It is also important to note that the frequency of the pulses generated by the encoder is proportional to the speed of the motor, which can be used as an estimation of the motor speed.

For correct reading and interpretation of the encoder signals, decision making is based in a Finite State Machine (FSM), as seen in Fig.4. Each state depends on the encoder channels value, A and B. R is the direction of rotation, where + is

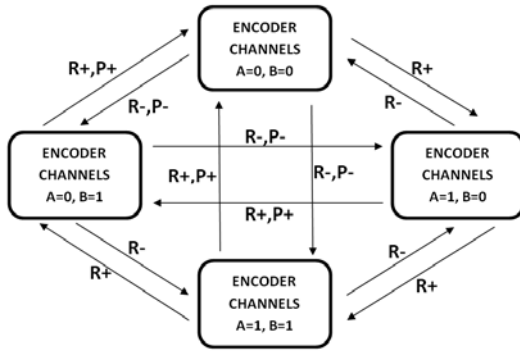


Fig. 4. State machine diagram for encoder reading.

forward and - reversal, and P is the count of the number of encoder pulses. In this FSM, the current state matches the previous inputs to the system. For example, if the system gets  $A = 0, B = 0$  as inputs, it goes to state  $A = 0, B = 0$ .

Depending on the channels sequence of each encoder, motor rotation direction can be detected, as explained in Fig.3, and when the encoder has completed a cycle, covered by four states, a pulse is added or subtracted in the pulses count. The implemented state machine also takes into account the situations in which the encoder reading skips a state, assuming a rotation direction and adding or subtracting the corresponding pulse.

This motor peripheral has been designed so that the processor requests a predetermined motion and target distance. The peripheral is continuously reading the encoders with the explained FSM, and stops the motors when the numbers of given encoder pulses are equal to the target numbers. Furthermore, the peripheral generates an interrupt to report the processor that the robot has reached the destination, which prevents the processor from making an unnecessary reading loop.

A photograph of the developed platform can be seen in Fig.5. It can be appreciated the division in three layers (from bottom to top): traction, signal conditioning and electronic, and processing layer. As the figure shows, the ultrasonic receiver is situated at the top of the robot, and in its geometric center, so any turn of the robot does not modify the ultrasonic-based positioning estimation of the robot. The system has been implemented on a low-cost Xilinx Spartan 3A FPGA (XC3S400A).

The navigation software is responsible for the reading of distances and calculates the robot position using trilateration. Furthermore, when the robot is required to go to a given position, the software handles all navigation stages. First of all, robot software performs a rotation in order to orientate the robot to the target point, and then calculates the distance that separates it from that point. After that, it orders the motor peripheral to start the motors, giving the number of necessary encoder pulses. When the number of encoder pulses has

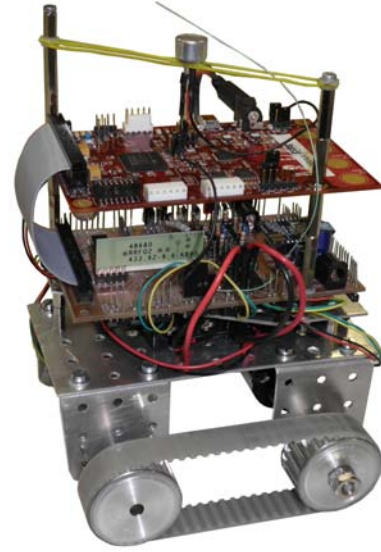


Fig. 5. Picture of the developed platform.

reached the target the software is noticed, and it recalculates the robot new position using the positioning peripheral. If the difference between the new position and the target position is greater than a threshold, the algorithm makes another iteration to reach the target point. If an obstacle is detected by the obstacle peripheral when moving, the software order the motor peripheral to stop the robot in order to avoid any collision.

#### IV. RESULTS

The structure measures 16 cm (W) x 15 cm (L) x 8 cm (H), which turns out to be the right size for our network, and big enough to house the circuit boards that are responsible for the node proper operation. To place the electronic boards on the platform, there is a two level structure, fixed by spacers, and an aluminum piece that leaves a space beneath the boards to accommodate the power system node, a block of six AA-size batteries. Once assembled electronic boards, the structure reaches a height of 20 cm.

To test the developed system accuracy, it has been made a test consisting of moving the robot from one point to another ten times and record the results. As the initial orientation of the robot is not aligned with the objective point, the robot has to do a small rotation of about  $25^\circ$ , and a forward movement of about 1590 mm.

The results of this test are shown in TABLE I, where  $D_x$  is the error distance in the x-axis,  $D_y$  is the error distance in the y-axis, Derror is the absolute distance error, Anglerr is the angular error between the ideal route and the real route, and error distance (%), is the relation between the distance error and the total distance travelled by the robot. Fig.6 shows an outline of the approach adopted by the node and the distance measurement error.



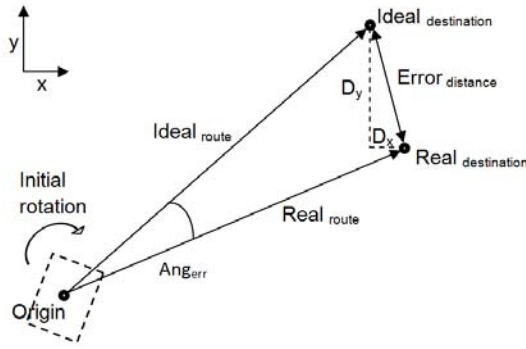


Fig. 6. Navigation experiment. Real and ideal paths. Error calculation method.

Test #	$D_x$ (mm)	$D_y$ (mm)	$D_{err}$ (mm)	$Ang_{err}^{\circ}$	error distance (%)
1	68	12	69.05	0.044	4.41
2	93	26	96.57	0.06	5.97
3	63	11	63.95	0.041	4.06
4	78	35	85.49	0.053	5.33
5	29	91	95.51	0.059	5.94
6	66	70	96.21	0.059	5.94
7	12	69	70.04	0.044	4.44
8	61	0	61	0.039	3.89
9	72	37	80.95	0.051	5.06
10	82	20	84.4	0.053	5.26

TABLE I  
TESTS OF THE DEVELOPED SYSTEM. DISTANCE ERROR.

After observing the results obtained from the test, we conclude that the error obtained by the robot while trying to reach a given point is always positive. This indicates that the robot moves further away than required, which can be solved with more accurate calibration. This will significantly reduce the error.

As additional data, the average of the errors obtained in each test compared to the total distance is about 5 %. This is an error of the whole system, where a part of it is caused by traction problems, part caused by encoder calibration, and part caused by the ultrasonic positioning system. Furthermore, in the experiment, the distance error has been calculated using the ultrasound system, which has an average error of 43.55 mm and a standard deviation of 51.02 mm [20]. Using ultrasonic positioning, the errors in distance estimations have an influence on navigation error.

## V. CONCLUSIONS

This paper presented a robotic platform as a mobile node of an indoor positioning system. It uses ultrasonic sensors and encoders for localization purposes, achieving a greater precision by the fusion of these two methods. The final dimensions of the proposed robot are 16 cm (W) x 15 cm (L) x 20 cm (H), which make it suitable for indoor use. The robot uses caterpillar tracks in order to rotate without advancing, which is important for localization purposes.

## ACKNOWLEDGMENT

This work has been supported by (left blank for blind review).

## REFERENCES

- [1] K. Romer and F. Mattern, "The design space of wireless sensor networks," *Wireless Communications, IEEE*, vol. 11, no. 6, pp. 54 – 61, Dec. 2004.
- [2] V. Giordano, P. Ballal, F. Lewis, B. Turchiano, and J. B. Zhang, "Supervisory control of mobile sensor networks: math formulation, simulation, and implementation," *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on*, vol. 36, no. 4, pp. 806 –819, Aug. 2006.
- [3] M. Rahman, M. Miah, W. Gueaieb, and A. Saddik, "Senora: A p2p service-oriented framework for collaborative multirobot sensor networks," *Sensors Journal, IEEE*, vol. 7, no. 5, pp. 658 –666, May 2007.
- [4] A. Ward, A. Jones, and A. Hopper, "A new location technique for the active office," *Personal Communications, IEEE*, vol. 4, no. 5, pp. 42 –47, Oct. 1997.
- [5] M. McCarthy and H. Muller, "Rf free ultrasonic positioning," in *Wearable Computers, 2003. Proceedings. Seventh IEEE International Symposium on*, Oct. 2003, pp. 79 – 85.
- [6] [Online]. Available: <http://www.arickrobotics.com/>
- [7] [Online]. Available: <http://www.videredesign.com>
- [8] [Online]. Available: <http://www.themachinelab.com/MMP-8.html>
- [9] [Online]. Available: <http://www.therobotshop.com/>
- [10] [Online]. Available: <http://www.sugv.com/>
- [11] [Online]. Available: <http://www.roboticsconnection.com>
- [12] K. P. S. Bergbreiter, "Cotsbots: An off-the-shelf platform for distributed robotics," in *IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2003. [Online]. Available: <http://berkeley.edu>
- [13] G. S. G.T. Sibley, M.H. Rahimi, "Robomote: A tiny mobile robot platform for large-scale ad-hoc sensor networks," in *IEEE/ICRA Intl. Conf. on Robotics and Automation*, 2002. [Online]. Available: <http://www.scuhs.edu/>
- [14] K. Dante, M. Rahimi, H. Shah, S. Babel, A. Dhariwal, and G. Sukhatme, "Robomote: enabling mobility in sensor networks," in *Fourth Intl. Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, 2005.
- [15] L. Navarro-Serment, R. Grabowski, and C. Paredis, "Millibots," *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, 2002.
- [16] M. McMickell, B. Goodwine, and L. Montestruque, "Micabot: a robotic platform for large-scale distributed robotics," in *IEEE/ICRA Intl. Conf. on Robotics and Automation*, 2003.
- [17] R. Rusu, R. Robotin, G. Lazea, and C. Marcu, "Towards open architectures for mobile robots: Zeero," in *IEEE Intl. Conf. On Automation, Quality and Testing, Robotics, Vol. 2*, 2006, pp. 260–265.
- [18] K. Murase, K. Sekiyama, T. Naniwa, N. Kubota, and J. Sitte, "Universal fpga microcontroller module for autonomous minirobots," in *3rd Intl. Symp. On Autonomous Minirobots for Research and Edutainment*, 2005.
- [19] A. Sanchez, S. Elvira, A. de Castro, G. Glez-de Rivera, R. Ribalda, and J. Garrido, "Low cost indoor ultrasonic positioning implemented in fpga," in *Industrial Electronics, 2009. IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE*, Nov. 2009, pp. 2709 –2714.
- [20] A. Sanchez, A. de Castro, G. Glez-de Rivera, and J. Garrido, "Fpga-based embedded system for ultrasonic positioning," in *Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium on*, Jul. 2010, pp. 3051 –3056.